INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

EL FUTURO DEL DINERO | EN BUSCA DE LOS AXIONES | EL OSCURO ORIGEN DE LAS SERPIENTES

N.º 498

MARZO 2018

MATERIA OSCURA
En busca de los axiones

AGRICULTURA
La revolución del fitobioma

EVOLUCIÓN
El oscuro origen de las serpientes

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

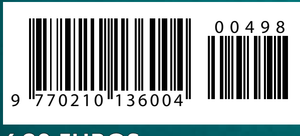
Marzo 2018 InvestigacionyCiencia.es

Edición española de Scientific American

EL FUTURO DEL DINERO

Las criptomonedas operan al margen de bancos y Gobiernos

¿Corregirán los fallos de las redes financieras actuales, o los empeorarán?



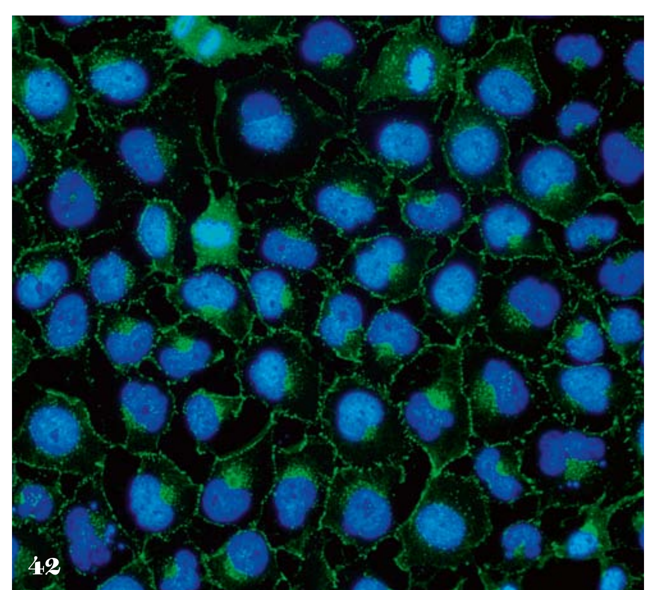
6,90 EUROS



NASA/LABORATORIO DE IMÁGENES CONCEPTUALES/CENTRO GODDARD DE VUELOS ESPACIALES *(recreación artística de un blázar)*

ARTÍCULOS







INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA



En los últimos años, las criptomonedas como el bitcóin han sido objeto de grandes inversiones y de una enorme atención mediática. Sin embargo, buena parte del público e incluso muchos líderes del mundo financiero ignoran cómo funcionan realmente. Sus partidarios alaban su potencial para mejorar el sistema económico global. Los escépticos insisten en andar con pies de plomo en un terreno que está cambiando a una velocidad vertiginosa. Ilustración de Borja Bonaque.

redaccion@investigacionyciencia.es



Enero 2018

SALUD, ENFERMEDAD Y ENTORNO

El tema abordado por Cristian Saborido en «Qué significa estar sano o enfermo?» [Investigación y Ciencia, enero de 2018] es de una enorme importancia científica y ética, tanto individual como social. Estando muy bien planteado por el autor el panorama general, los actuales paradigmas de la teoría general de los sistemas complejos aportan algunas conclusiones más concretas a las definiciones de salud y enfermedad, tanto somáticas como psíquicas.

En primer lugar, permiten diferenciar la enfermedad concreta —que siempre es particular de una estructura local del sistema vivo— del «estado de enfermedad», el cual constituye un modo de estar viviendo del sistema vivo holístico, como ya fue señalado por Pedro Laín Entralgo. El sistema viviente no es un órgano, y ni siquiera el organismo completo, puesto que abarca al individuo orgánico entero y su relación con el nicho ecológico, en donde vive y del que vive, debido a su conducta de apropiación de recursos y eliminación de sus desechos biológicos. De aquí que los conceptos de «apropiado» e «inapropiado» sean fundamentales para entender la salud y la enfermedad, como señaló Hans-Georg Gadamer en su libro *El estado oculto de la salud.*

En esta visión, «apropiado» se refiere tanto a la inherencia de las dimensiones orgánicas a la propia mismidad del organismo, como también a si la conducta resulta apropiada a la realidad del nicho ecológico, con el cual el individuo orgánico realiza su vida en una continua autocreación o «autopoiesis» (el principio de vida de Hans Jonas). Así, Diego Gracia ya definió la enfermedad somática como una «expropiación». Además, el concepto de «des-apropiación», aplicado a la estructura del comportamiento humano frente a la auténtica apropiación, permite aproximarse a catalogar una conducta como psicopatológica, tal y como postuló en su día Viktor von Gebsattel y yo mismo he desarrollado en mi libro *Fundamentos antropológicos de la psicopatología.*

Héctor Pelegrina Cetran
Academia de Medicina de Chile

Responde Saborido: *El lector reivindica la relevancia de ciertas corrientes de la teoría y la filosofía de la biología contemporáneas con respecto a la discusión acerca de la definición de salud y enfermedad que trataba en mi artículo, algo con lo que estoy de acuerdo.*

Tal y como señala, sería muy interesante considerar las ideas de varios teóricos ya clásicos que han reflexionado con profundidad sobre lo que significa estar sano o enfermo, como Hans-Georg Gadamer o Pedro Laín Entralgo. Estos autores remarcaron el carácter contextual de los fenómenos biológicos y la importancia de las características del entorno ecológico en el que los organismos se desenvuelven.

En esta línea, probablemente el pensador más influyente sea el filósofo y médico francés Georges Canguilhem (1904-1995). Para Canguilhem, lo que caracteriza a los seres vivos es su carácter «inherentemente normativo»: el hecho de vivir supone tener la capacidad de crear, identificar, obedecer e incluso transformar la percepción de «lo correcto» y «lo incorrecto». Todo organismo, sea este una bacteria o un humano, establece una relación dinámica con su entorno en la que «evalúa» lo que le rodea en términos de «bueno» (alimento, refugio...) y «malo» (amenaza, peligro...). Si no hiciese esto, el ser vivo no podría adaptarse a un entorno y no seguiría existiendo. En Lo normal y lo patológico *(1943), Canguilhem utiliza esta idea de normatividad biológica para fundamentar la distinción entre lo sano y lo enfermo: lo patológico sería aquel estado biológico en el que un organismo no es capaz de desarrollar esta capacidad normativa de un modo adecuado y, por tanto, se da un desajuste entre las capacidades del organismo y las exigencias del contexto.*

En la teoría biológica contemporánea, esta concepción normativa de los seres biológicos ha sido rescatada en cierta medida por corrientes y autores que defienden que los seres vivos son principalmente seres autónomos; es decir, sistemas capaces, hasta cierto punto, de modificar su conducta e incluso su propia estructura y responder así a las condiciones del entorno.

Además, la autonomía es también una noción central para muchos colectivos que abogan por los derechos de los pacientes y los discapacitados. La meta de la medicina, sostienen estos movimientos, no debería ser que todas las personas se ajusten a un modo predeterminado de vivir en el mundo, sino que todos seamos capaces de alcanzar, desde nuestras diferencias particulares, la mayor autonomía posible. Para ello no solo es importante tratar a los pacientes, sino actuar sobre las condiciones del entorno para evitar el desajuste del que advertía Canguilhem.

Estas ideas (así como otras que se puedan desarrollar a partir de las propuestas de Hans Jonas o Diego Gracia, a quienes cita el lector) están empezando a ser aplicadas en la teoría médica. Es esperable que ayuden a desarrollar nuevas perspectivas que, tal y como se requería en mi artículo, puedan dar cuenta de los múltiples aspectos biológicos, sociales y psicológicos que conforman nuestra forma de entender la salud y la enfermedad.

Erratum corrige

En la entrada «Comunidades sostenibles» del artículo **Las 10 técnicas emergentes más prometedoras del momento** [Daniel M. Kammen; Investigación y Ciencia, febrero de 2018] se mencionaba un programa de reforma de viviendas en un barrio de ingresos bajos cercano al puente Golden Gate, en California. Dicho programa se llevará a cabo en la ciudad de Oakland, en el mismo estado.

Este error ha sido corregido en la edición digital del artículo.

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S. A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.



LOS PRIMEROS HABLANTES del protoindoeuropeo probablemente eran jinetes nómadas.

LINGÜÍSTICA

Lengua madre

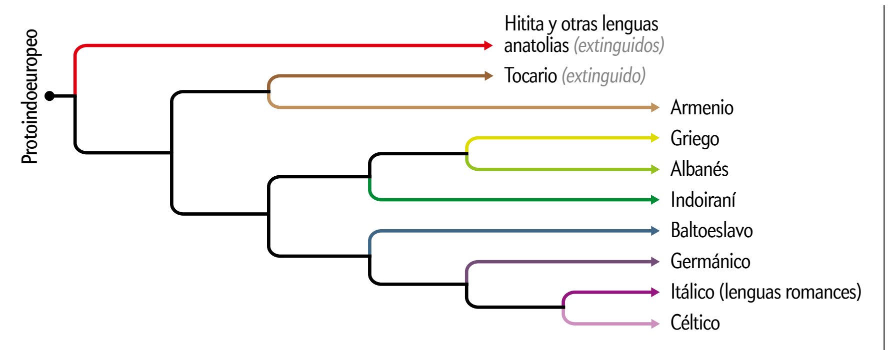
Nuevas pruebas genéticas alimentan el debate sobre los orígenes de la lengua protoindoeuropea

Hace cinco milenios, hordas de jinetes nómadas procedentes de la estepa ucraniana alcanzaron toda Europa y partes de Asia. Trajeron consigo una lengua que es el origen de otras muchas habladas hoy: el inglés, el español, el hindi, el ruso o el persa, entre otras. Esa es la explicación que goza de mayor aceptación sobre el origen de esta antigua lengua, denominada protoindoeuropeo [*véase* «La guerra de las lenguas», por Michael Balter; Investigación y Ciencia, julio de 2016]. Hallazgos genéticos recientes confirman esa hipótesis, pero también suscitan cuestiones sobre cómo evolucionó y se propagó el lenguaje prehistórico.

No existen registros escritos del protoindoeuropeo, pero los lingüistas creen haberlo reconstruido en buena medida. Algunas palabras, como las inglesas *water* (agua), *father* (padre) y *mother* (madre), siguen en uso aún hoy. En los años cincuenta del siglo xx, la arqueóloga Marija Gimbutas propuso por primera vez el origen ucraniano, conocido como la hipótesis de los kurganes. Gimbutas trazó la lengua hasta la cultura yamnaya, integrada por tribus pastoriles de las praderas del sur de la actual Ucrania que domesticaron el caballo.

En 2015, se secuenció el ADN extraído de huesos y restos humanos antiguos originarios de numerosos enclaves de Europa y Asia. Los resultados indican que hacia el 3500 a.C. (más o menos la misma época en que muchos lingüistas sitúan el origen del protoindoeuropeo y en que los arqueólogos fechan la domesticación del caballo) los genes de los yamnaya reemplazaron cerca del 75 por ciento del acervo génico de Europa. Sumados a las pruebas arqueológicas y lingüísticas, los datos genéticos inclinan claramente la balanza a favor de la hipótesis de los kurganes.

CHRIS GASH



UN GRAN PORCENTAJE de las lenguas habladas hoy (inglés, hindi o persa, entre otras) descienden de una única lengua madre, el protoindoeuropeo. Nuevos indicios genéticos avalan la idea de que esta lengua fue difundida por nómadas de las estepas de Ucrania que viajaron a lomos de caballo. El diagrama es simplificado y solo pretende mostrar los lazos generales entre los grupos lingüísticos, no los datos reales de divergencia.

Con todo, nuevos descubrimientos complican el relato. En un estudio publicado el pasado junio en *Journal of Human Genetics*, los investigadores secuenciaron el ADN mitocondrial de 12 individuos yamnaya, junto con el de sus antecesores y descendientes inmediatos. Los restos se desenterraron en túmulos funerarios, o kurganes (de los que la teoría toma su nombre), ubicados en la Ucrania actual. Habían sido sepultados en capas superpuestas desde el final de la Edad de Piedra hasta el inicio de la Edad de Cobre, entre el 4000 y el 3000 a.C., la misma época en que se produjo el episodio de reemplazo genético en Europa. El ADN mitocondrial (heredado de la madre) de los enterramientos más primitivos y de edad intermedia era casi por completo local. Pero el de las muestras más recientes contenía ADN procedente de Europa central, de las actuales Polonia, Alemania y Suecia. Este descubrimiento indica que «hubo migraciones pendulares, de ida y vuelta», afirma el autor principal Alexey Nikitin, profesor de arqueología y genética en la Universidad Estatal de Grand Valley. En otras palabras, «no fue un desplazamiento sin retorno».

Estos descubrimientos otorgan a la hipótesis de los kurganes «mucho más crédito», asegura Nikitin. Pero sostiene que sus nuevos resultados muestran asimismo que la migración tuvo lugar en una escala menor de lo que se había especulado; los especímenes más recientes solo llegaron aparentemente hasta Europa central, antes de regresar, aunque la lengua acabó hablándose en lugares tan remotos como las islas británicas. Nikitin opina también que la diseminación no fue tan cruenta como se ha supuesto con frecuencia. «Una campaña militar podría explicar el reemplazo genético. Pero es improbable que sucediera así», matiza.

David Anthony, antropólogo en el Colegio Hartwick y coautor de varios estudios genéticos previos, pero que no ha participado en este último trabajo, califica los nuevos hallazgos como sumamente convincentes. «La domesticación del caballo abrió un corredor a través de las estepas que penetró en la India e Irán, por un lado, y en Europa, por el otro. Cuando los yamnaya irrumpieron en Europa oriental y occidental, su acervo génico era muy distinto del que había allí antes», explica. «Esto permite obtener una visión clara [de cómo se propagó la lengua madre] y explica por qué se ven con tanta facilidad las migraciones en el mapa.»

Pero Anthony discrepa de la interpretación de que fue un asunto de escala reducida y mayormente pacífico. Sin escritura, la transmisión del lenguaje en aquella época debió depender sobre todo del contacto directo, argumenta, lo cual indicaría que los hablantes del protoindoeuropeo penetraron profundamente en toda Europa y Asia. Cree que las pistas lingüísticas y arqueológicas, como las armas halladas en las tumbas, apuntan a que los creadores del lenguaje tenían una cultura guerrera. No obstante, Nikitin cree que las hachas encontradas eran meramente «decorativas».

Ambos investigadores advierten contra la interpretación basada únicamente en los datos genéticos. Intervinieron muchos otros factores sociales y culturales. «Los cambios lingüísticos fluyen, por lo general, en la dirección de los colectivos con mayor estatus económico, poder político y prestigio. Y en las situaciones de mayor brutalidad, fluye en la dirección de los supervivientes», concluye Anthony.

—*Roni Jacobson*

TAXONOMÍA

Confusión de especies

El pez óseo más grande del mundo había sido identificado erróneamente

Desde hace tiempo se atribuía al pez luna *Mola mola* el honor de ser el mayor de los teleósteos, el gran grupo de peces cuyo esqueleto está formado por tejido óseo, no por cartílago. Resulta que andábamos errados. Un equipo de investigación ha informado este enero en *Ichthyological Research* que el mayor es, en realidad, otro pez luna, *Mola alexandrini*, algunos ejemplares del cual habían sido confundidos con el anterior. Etsuro Sawai, biólogo de la Universidad de Hiroshima, encabezó el grupo que reexaminó cientos de especímenes de pez luna y archivos científicos de todo el planeta.

M. alexandrini, distinguible por la presencia de pequeñas protuberancias en la cabeza y la barbilla, llega a superar los tres metros de largo y a pesar más de 2300 kilogramos. El estudio sugiere que podría haber muchos más ejemplos de identificación errónea de especies animales, sobre todo si se tiene en cuenta que el pez luna es bastante grande y difícil de pasar por alto, afirma Byrappa Venkatesh, genetista en el Instituto de Biología Celular y Molecular de Singapur, que no ha participado en la novedosa investigación.

La coautora Marianne Nyegaard, ictióloga de la Universidad Murdoch de Australia, explica que este tipo de aclaración es vital en biología, y resulta importante para entender, por ejemplo, las consecuencias ecológicas del cambio climático. Los cambios de temperatura podrían modificar las áreas de distribución conocidas de especies que no habrían sido correctamente identificadas.

—*Doug Main*



UN BUCEADOR nada junto a un ejemplar de *Mola alexandrini*.

FUENTE: «MAPPING THE ORIGINS AND EXPANSION OF THE INDO-EUROPEAN LANGUAGE FAMILY», POR REMCO BOUCKAERT ET AL. EN *SCIENCE*, VOL. 337, 24 DE AGOSTO, 2012; TIFFANY FARRANT-GONZALEZ (*gráfica*); HASAMA UNDERWATER PARK (*pez luna*)

AERONÁUTICA

Cielos más limpios

Un nuevo diseño de avión busca aumentar el rendimiento del combustible y reducir las emisiones

Las emisiones de la aviación constituyen un grave problema para el clima. Si el sector aéreo fuera un país, sería el séptimo del mundo en contaminación por carbono. Los expertos predicen que, al ritmo actual, las emisiones asociadas se habrán triplicado para 2050, conforme aumente la demanda de vuelos. Para hacer frente a este panorama, un equipo de científicos del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), junto con colaboradores de la industria y del Gobierno de EE.UU., está intentando cambiar radicalmente el diseño de los aviones.

Si se valida en pruebas a escala real, su prototipo, apodado D8 «de burbuja doble», podría mejorar el rendimiento del combustible y reducir de manera considerable la huella de carbono del sector. El nuevo diseño presenta cambios importantes con respecto a los aviones estándar para 180 pasajeros: el Boeing 737 y el Airbus A320. Por ejemplo, el fuselaje tiene una forma más ancha y ovalada. «Es como dos burbujas [unidas] lado a lado», explica Alejandra Uranga, profesora de ingeniería mecánica y aeroespacial en la Universidad de California del Sur. Esta modificación hace que el propio fuselaje genere algo de sustentación, señala Uranga, que colidera el proyecto junto con Edward Greitzer, del MIT. La nueva forma permite que las alas y la cola sean más pequeñas y livianas. Al mismo tiempo, el morro del avión también es más aerodinámico.

El cambio principal, sin embargo, radica en la posición de los motores. En un avión tradicional, el aire que circula sobre la parte superior se ralentiza, lo que genera resistencia aerodinámica y reduce la eficiencia de la aeronave. El nuevo diseño no tiene los motores bajo las alas, como es habitual, sino sobre el cuerpo de la aeronave y cerca de la cola. Desde allí succionan y vuelven a acelerar la lenta capa de aire, lo que reduce en gran medida la resistencia. Uranga sostiene que tales modificaciones podrían recortar hasta en un 37 por ciento el uso de combustible de un avión de pasajeros típico.

Mark Drela, ingeniero jefe del proyecto, Uranga, Greitzer y sus colaboradores del MIT, la NASA y las compañías Aurora Flight Sciences y Pratt & Whitney ya han construido un modelo de la aeronave a escala 1:11 y lo han puesto a prueba en un túnel de viento de la NASA. Uranga estima que el consumo de combustible podría reducirse hasta en un 66 por ciento si el nuevo diseño se combinase con futuros avances tecnológicos.

Otros expertos señalan que los desarrolladores del nuevo modelo aún deberán superar obstáculos económicos y asegurar que los motores son lo bastante robustos para soportar la nueva configuración. Aun así, «se trata de una idea y un diseño muy atractivos», apunta Brian J. German, ingeniero aeroespacial del Instituto de Tecnología de Georgia que no participó en el trabajo. La compañía Aurora está estudiando ahora el desarrollo de un prototipo a la mitad del tamaño real. Si sus esfuerzos tienen éxito, puede que, para 2035, ya haya viajeros volando en las nuevas aeronaves.

—Annie Sneed

1

2



MODELO REDUCIDO del avión D8 «de burbuja doble» (*1*). Un fuselaje más ancho y una nueva posición de los motores disminuyen la resistencia aerodinámica y el peso, lo que permite ahorrar combustible (*2*).

CORTESÍA DE DAVID C. BOWMAN Y EL CENTRO LANGLEY DE INVESTIGACIÓN DE LA NASA (*1*); CORTESÍA DE LA NASA, INSTITUTO DE TECNOLOGÍA DE MASSACHUSETTS Y AURORA FLIGHT SCIENCES (*2*)

MEDIOAMBIENTE

Ríos de plástico

Una parte importante de la basura de los océanos proviene de solo diez ríos

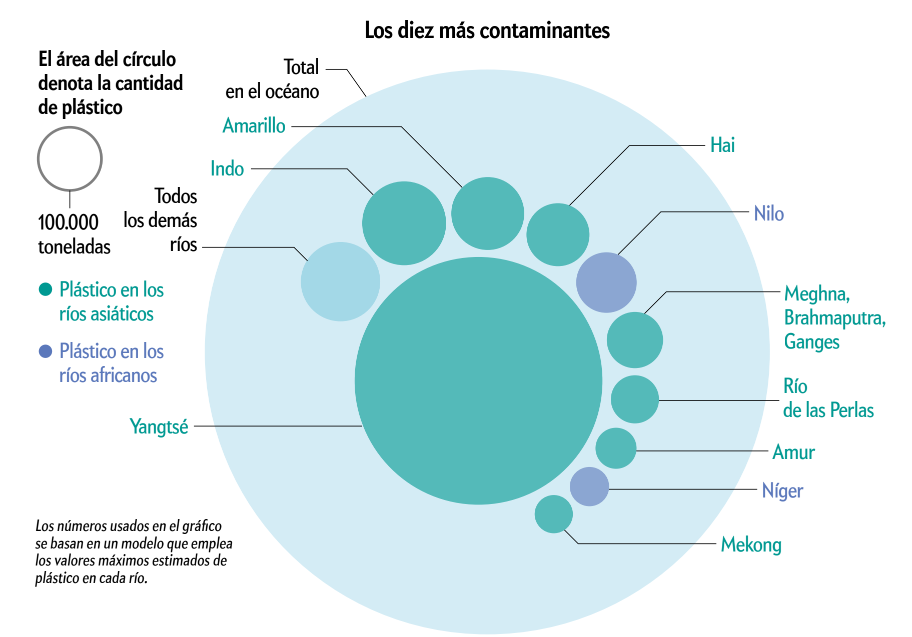
Nuestros mares se están ahogando en plástico. Cada año, la asombrosa cantidad de ocho millones de toneladas de este material va a parar a los océanos, y es esencial descubrir exactamente cómo acaba allí. Según un estudio reciente, más de una cuarta parte de todos esos residuos podrían estar llegando desde solo diez ríos, ocho de ellos en Asia.

«Los ríos transportan la basura a lo largo de grandes distancias y conectan casi todas las superficies terrestres con los océanos», por lo que constituyen uno de los principales campos de batalla en la lucha contra la contaminación del mar, explica Christian Schmidt, hidrogeólogo del Centro Helmholtz de Investigaciones Ambientales, en Leipzig.

Schmidt y sus colaboradores examinaron los datos publicados sobre la concentración de plástico en 57 ríos de diversos tamaños de todo el mundo. Estas mediciones incluían botellas y bolsas, así como fibras y partículas microscópicas. Los investigadores multiplicaron estas concentraciones por el caudal de agua de los ríos para calcular el peso total de plástico que vertían al mar. Luego introdujeron los datos en un modelo que los comparó con el peso estimado de los residuos plásticos generados por persona y día a lo largo de cada río.

Los resultados, publicados el pasado mes de noviembre en *Environmental Science & Technology*, demuestran que, en conjunto, los ríos examinados vierten entre 0,47 y 2,75 millones de toneladas de plástico al mar cada año, cifra que varía según los datos usados en los modelos. Los diez que transportan el 93 por ciento de esa basura son los ríos Yangtsé, Amarillo, Hai, de las Perlas, Amur, Mekong, Indo y delta del Ganges en Asia; y Níger y Nilo en África. Se calcula que solo el río Yangtsé vierte hasta 1,5 millones de toneladas de desechos plásticos en el mar Amarillo.

Una mejor recogida y gestión de los residuos en las regiones más contaminadas ayudaría a detener esta marea, según Schmidt, pero también es esencial concienciar a la gente. —*Prachi Patel*



ECOLOGÍA

El desove mueve montañas

La freza del salmón ha acelerado la erosión de los lechos fluviales en el curso de los milenios

A primera vista, la reproducción de los peces podría parecer poco trascendente, pero los innumerables desoves acaecidos a través del tiempo parecen haber dejado su huella en el paisaje. En un estudio novedoso, se ha modelizado el modo en que la freza modifica los ríos de la costa norte del Pacífico de EE.UU. Resulta que el apareamiento del salmón ha contribuido a modelar las laderas montañosas de la región. El salmón retorna del mar a los ríos y los arroyos donde nació para procrear. Una vez que la hembra encuentra un punto donde los cantos y la grava del lecho poseen la talla adecuada, excava un hoyo para depositar la puesta.

Después de que el macho fecunda los huevos, la hembra los entierra con el sedimento de otro agujero que cava corriente arriba. La tarea erosiona el lecho fluvial porque facilita que los sedimentos y la grava sean arrastrados río abajo, afirma uno de los autores del estudio, Alexander K. Fremier, limnólogo de la Universidad Estatal de Washington. Él y sus colaboradores recabaron datos sobre el ritmo de la erosión provocada por los salmones en un arroyo experimental y extrapolaron sus hallazgos a ríos reales en el curso de millones de años. El desove habría hecho que algunos lechos se erosionaran más de un 30 por ciento más que si no se diera la freza, describen en el estudio, publicado en línea el pasado septiembre en la revista *Geomorphology*. David R. Montgomery, catedrático de geomorfología de la Universidad de Washington, que no ha participado en la investigación, califica el trabajo como una fascinante «muestra de la vinculación que puede existir entre la actividad de los seres vivos y ciertos fenómenos que solemos considerar procesos físicos». Las propias investigaciones de Montgomery indican que el alzamiento de las cadenas montañosas (orogenia) podría haber fomentado la diversificación de los salmones, a la par que su especialización y especiación.


UN SALMÓN ROSADO en pleno desove.

El nuevo estudio sugiere que la freza del salmón podría acelerar tales procesos al alterar el ritmo de erosión y las pendientes de los ríos. Montgomery opina que ese efecto sería mínimo en comparación con el causado por la orogenia, pero matiza que Fremier y sus colaboradores han abierto la puerta a nuevas preguntas sobre el fenómeno y sus consecuencias. —*Doug Main*

FUENTE: «EXPORT OF PLASTIC DEBRIS BY RIVERS INTO THE SEA», POR CHRISTIAN SCHMIDT ET AL. EN *ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY*, VOL. 51, N.º 21, 7 DE NOVIEMBRE DE 2017; AMANDA MONTAÑEZ *(gráfico)*; ASHLEY MORGAN, GETTY IMAGES *(salmón)*



UNO DE LOS FLOTADORES AUTÓNOMOS que se usarán para explorar de cerca la fusión del hielo en la Antártida.

CIENCIAS DE LA TIERRA

Drones bajo el hielo

Una arriesgada misión robótica intentará estudiar el proceso de fusión de una plataforma antártica

Muy por debajo de la superficie brillante y lisa de las plataformas de hielo de la Antártida, existe un paisaje oscuro que no se parece a ningún otro en la Tierra, donde terrazas y cañones invertidos penetran hasta muy arriba en el hielo. Alimentadas por los glaciares situados en tierra firme, estas cornisas de hielo gigantes emergen en las frías aguas del océano Antártico. A principios de este año, una flota de siete robots submarinos desarrollados por la Universidad de Washington partió hacia ese mundo en una arriesgada misión. Su objetivo: ayudar a pronosticar el aumento del nivel del mar mediante observaciones directas de la fusión de este paisaje oculto y vuelto del revés, donde se mezclan capas de agua templada y fría.

«Sabemos desde hace unos cuarenta años que las plataformas de hielo son intrínsecamente inestables», explica Knut Christianson, glaciólogo de la misión y uno de los responsables de la iniciativa Future of Ice («El futuro del hielo»), de la Universidad de Washington. «Sin embargo, no entendemos realmente la variabilidad de estos sistemas, y menos aún cómo reaccionan ante una perturbación externa importante, como el aumento de la temperatura del mar.»

Hasta ahora, los científicos habían tratado de explorar la parte inferior de las plataformas de hielo perforándola o enviando submarinos robóticos en viajes cortos por debajo de ellas. Pero estos esfuerzos se han limitado a áreas pequeñas y a períodos breves, y han ofrecido instantáneas que no reflejan necesariamente el comportamiento global del sistema de hielo y agua, señala Christianson.

El nuevo equipo de máquinas exploradoras consta de tres vehículos robóticos autopropulsados, bautizados como *Seagliders* («planeadores marinos»), acompañados de cuatro flotadores que navegan a la deriva. Los drones contienen instrumentos para medir la temperatura, la presión, la turbulencia y el oxígeno disuelto. Cada uno de los *Seagliders*, con un coste de unos 100.000 dólares, seguirá una ruta de varias semanas por debajo y alrededor de las plataformas de hielo antes de regresar. Estos robots nadan ajustando su flotabilidad y sus alas para deslizarse lentamente en una dirección programada. Los flotadores, en cambio, con un precio de unos 30.000 dólares, están a merced de las corrientes oceánicas: solo pueden regular su flotabilidad para subir o hundirse.

Si un robot explorador o uno de los flotadores asciende por una grieta o queda atrapado bajo una de las terrazas, no dispondrá de plan de escape ni de medios para pedir ayuda. «Es muy arriesgado», reconoce Mick West, ingeniero del Instituto de Tecnología de Georgia que no participó en el trabajo de la Universidad de Washington, pero que, en 2015, liberó un robot amarrado a través de la plataforma de Ross.

Si se pierden algunos drones, los miembros del equipo planean regresar en 2019 para recuperarlos. En caso de no encontrarlos, los aparatos cuentan con batería suficiente para funcionar durante un año más, y cualquiera que apareciese más tarde podría ser rescatado por otros investigadores y devuelto a sus dueños. Pero, mucho antes de eso, Christianson espera poder utilizar los datos que obtenga esta flota submarina para mejorar los modelos globales de aumento del nivel del mar. —*Mark Harris*

PAUL G. ALLEN PHILANTHROPIES (*flotador*); CENTRO DE CULTURA CONTEMPORÁNEA DE BARCELONA (*agenda*)

AGENDA

CONFERENCIAS

12 de marzo
Energía nuclear y energías renovables
Cayetano López, Universidad Autónoma de Madrid; Enrique Soria, CIEMAT
Fundación Juan March
Madrid
www.march.es

21 de marzo
Un mar de plásticos
Anna Sànchez Vidal, Universidad de Barcelona
Cafés Científicos
Casa Orlandai
Barcelona
www.cienciaensocietat.org

EXPOSICIONES

Juanelo Turriano: Genio del Renacimiento
Biblioteca Nacional de España
Madrid
www.bne.es

OTROS

14 de marzo — Jornada
Día de Pi
Organiza: Real Sociedad Matemática Española y otras entidades
Salamanca (evento principal)
Numerosas actividades en otras ciudades españolas
www.piday.es

14 de marzo — Talleres y charlas
BCAM Naukas: Día de Pi
Organiza: Centro Vasco de Matemática Aplicada, Universidad del País Vasco y plataforma Naukas
Bizkaia Aretoa
Bilbao
naukas.com

Hasta el 20 de marzo — Charlas, cine y talleres
Después del fin del mundo
Ciclo de actividades en centros cívicos y bibliotecas relacionadas con la exposición homónima del Centro de Cultura Contemporánea de Barcelona
Barcelona
www.cccb.es

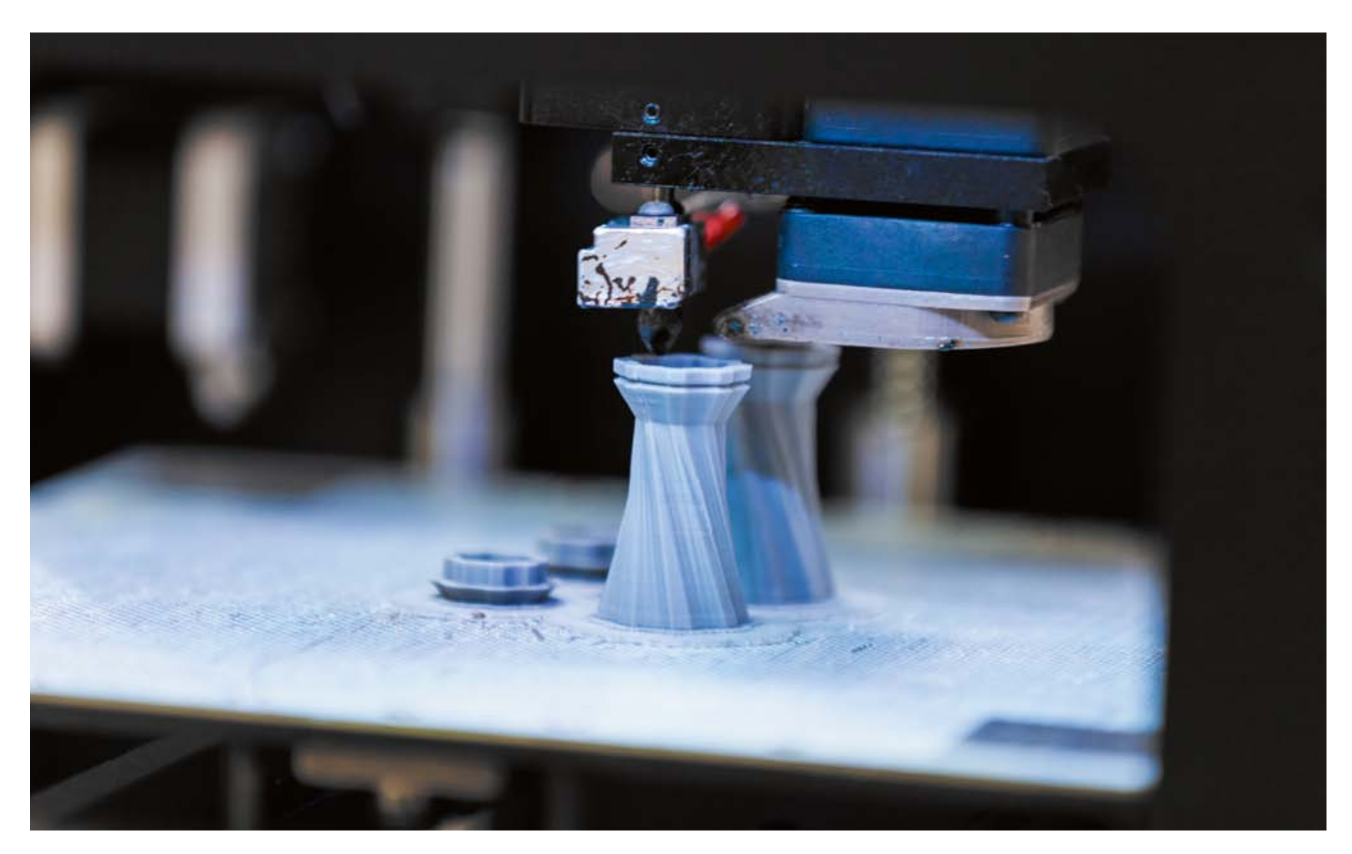


METALURGIA

Buenas noticias para la impresión en 3D con metales

Las nuevas técnicas de fabricación aditiva son compatibles con muy pocas aleaciones de utilidad industrial. Un nuevo método basado en la adhesión de nanopartículas podría solucionar el problema

IAIN TODD



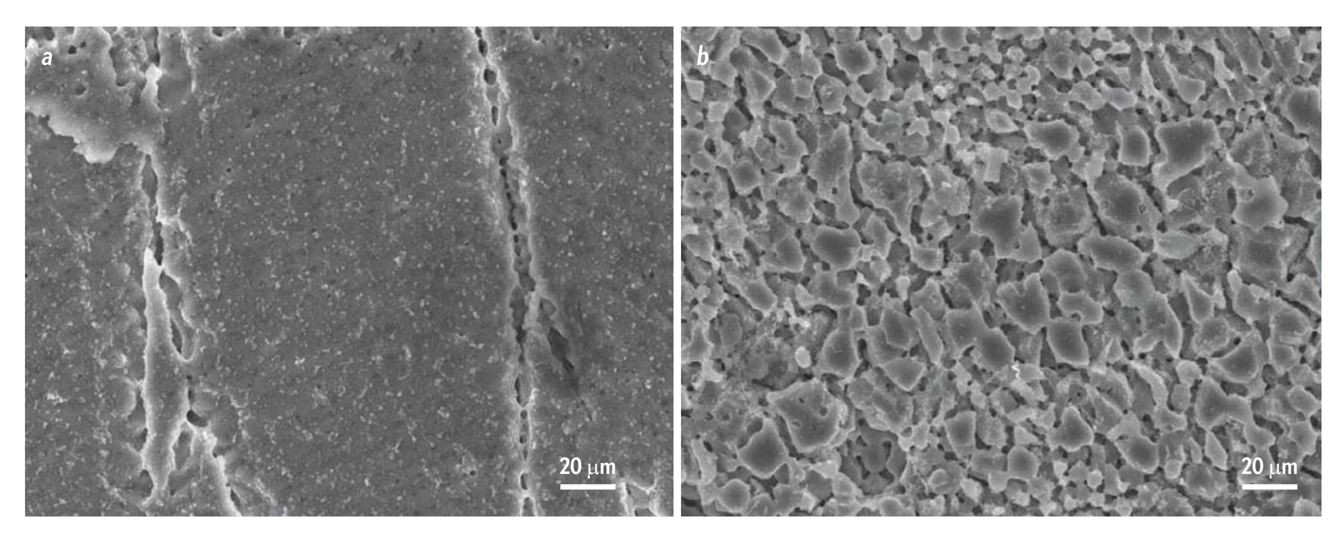
UNO DE LOS PRINCIPALES RETOS de la impresión en 3D es que pueda aplicarse a un abanico más amplio de materiales de interés industrial.

Hasta no hace mucho, la fabricación aditiva (o impresión en 3D) con metales se veía tan solo como un medio para obtener prototipos de componentes mecánicos industriales. Sin embargo, en la actualidad se considera que esta técnica cuenta con un alto potencial para transformar muchos sectores. Este cambio ha venido impulsado por diversos factores, como las geometrías complejas que se pueden conseguir, el número relativamente bajo de piezas que se requieren para obtener distintos componentes y el hecho de que los plazos se reducen con respecto a los que ofrecen los métodos al uso. No obstante, desde la perspectiva industrial, la gama de aleaciones metálicas que pueden emplearse en la fabricación aditiva es limitada, lo que constituye una barrera para su adopción generalizada. En un artículo publicado en *Nature* en septiembre del año pasado, John H. Martin, de los Laboratorios HRL y la Universidad de California en Santa Bárbara, y sus colaboradores han propuesto una técnica que podría solucionar este problema. Para ello han recurrido a un proceso mucho más antiguo: la fundición.

Granos columnares y grietas

La fabricación aditiva con metales consiste habitualmente en la deposición de capas de una aleación en forma de polvo o filamentos, que, mediante una fuente de calor que se mueve rápidamente, se fusionan para formar una masa sólida. La estructura tridimensional se crea conforme se superponen las sucesivas capas. La velocidad de solidificación es a menudo de un orden de magnitud superior a la observada en los métodos de fundición estándar, y la adición de capas causa un enfriamiento no uniforme, el cual, a su vez, conduce a elevados gradientes de temperatura o tensiones térmicas en la aleación.

El panorama se complica más aún debido a los procesos de solidificación que ocurren en los metales usados en



CUANDO SE SOMETEN A LA IMPRESIÓN EN 3D, muchas aleaciones de interés industrial desarrollan grietas y granos columnares; ello las convierte en inservibles para aplicaciones de ingeniería. Una nueva técnica basada en la adhesión de nanopartículas a la superficie de los gránulos de polvo utilizados como materia prima ofrece una posible solución al problema. Las imágenes muestran los distintos comportamientos de la aleación de aluminio Al7075. Cuando se somete directamente a la impresión en 3D, desarrolla grietas y granos columnares (*a*); en cambio, si antes se «funcionaliza» con nanopartículas, se obtiene un material sin grietas y cuya microestructura consiste en partículas equiaxiales (*b*).

aplicaciones de ingeniería, como las superaleaciones de níquel y aluminio de alta resistencia. Estos materiales suelen tener intervalos de temperatura relativamente amplios en los que coexisten las fases líquida y sólida, y en las condiciones impuestas por la fabricación aditiva a menudo se generan granos columnares o dendritas (formaciones cristalinas ramificadas). El contenido líquido de la aleación disminuye conforme progresa la solidificación y el líquido residual queda confinado en los canales entre las celdas o dendritas, donde se forma una película en la que una contracción localizada del sólido puede originar cavidades; si estas se propagan, surgen grietas, a veces denominadas roturas en caliente. Por tanto, el material resultante puede presentar tanto una microestructura columnar como numerosas grietas: ambos defectos inaceptables para aplicaciones de ingeniería.

El equipo de Martin sugiere una estrategia para atenuar esas roturas: cambiar el modo dominante de solidificación a fin de pasar de un crecimiento columnar direccional a uno no direccional que produzca granos equiaxiales (con un ancho, longitud y altura aproximadamente iguales). Sin embargo, las condiciones locales de solidificación que tienen lugar durante la impresión en 3D actúan en contra de este objetivo, ya que se crean pronunciados gradientes térmicos que frenan la formación repetida (nucleación) de las minúsculas semillas de cristal que posibilitan la aparición de granos equiaxiales. Así pues, el desafío estriba en encontrar una manera de que la nucleación pueda ocurrir en las condiciones de la fabricación aditiva.

En general, los intentos anteriores para resolver este problema se han centrado en ajustar los parámetros de operación de la impresión en 3D (tales como la velocidad, la potencia del láser o del haz de electrones que sirve para calentar la materia prima, o el patrón de movimiento que sigue la impresora para construir el objeto en cuestión) con el propósito de alterar las condiciones que favorecen el crecimiento columnar. Pero, por desgracia, ello ha resultado extremadamente difícil.

Inoculantes protectores

Por suerte, una solución al problema que nos ocupa puede hallarse en la fundición. En ella, unos aditivos llamados inoculantes se mezclan con un metal líquido con el fin de «sembrar» núcleos sobre los cuales crecerán nuevos cristales, incluso con gradientes térmicos pronunciados y velocidades de solidificación elevadas. El primer caso de manipulación de la microestructura mediante este método sucedió en 1906, cuando se agregó ferrosilicio a un crisol de hierro fundido. Desde entonces, los avances en los procesos de fundición han brindado la posibilidad de obtener, mediante aleaciones de alto rendimiento, materiales resistentes, los cuales carecen de agujeros y grietas, y contienen microestructuras equiaxiales.

Los inoculantes se añaden a la aleación en estado fundido, pero esto plantea dificultades en la fabricación aditiva, pues el baño de metal derretido tiene una longitud de tan solo unas decenas de micrómetros de longitud y, en cualquier punto dado, apenas dura unas decenas de microsegundos. La solución que proponen Martin y sus colegas permite suministrar en esa escala de tiempo una cantidad precisa de inoculante.

Los autores demuestran el potencial de su técnica con dos aleaciones de aluminio bien caracterizadas y ampliamente utilizadas: el Al7075, un material forjado (mecánicamente) que se emplea en aplicaciones aeroespaciales y que no se presta demasiado bien para la fusión, y el Al6061, una aleación de alta resistencia que se emplea en soldadura. En esencia, ambas son difíciles de tratar mediante impresión en 3D.

Los investigadores modificaron en primer lugar la superficie de la aleación en polvo, «decorándola» con nanopartículas de inoculante, que se adaptaron a la composición y a la red cristalina de cada aleación. Este polvo metálico «funcional» se usó luego en una máquina de impresión en 3D estándar, obedeciendo las condiciones de operación recomendadas por el fabricante. A fin de comparar, los autores

también probaron las mismas aleaciones sin someterlas al tratamiento superficial y en las mismas condiciones de operación.

Se observaron diferencias espectaculares entre las microestructuras obtenidas con los dos tipos de muestra. Como cabría esperar, las fabricadas a partir de las aleaciones que no habían sufrido ninguna modificación contenían granos columnares de gran tamaño y una elevada densidad de grietas. Por el contrario, el polvo metálico «funcional» produjo buenas microestructuras, equiaxiales y libres de grietas. Además, las propiedades mecánicas del Al7075 inoculado mejoraron notablemente en relación con las del polvo sin tratar, acercándose a las de la misma aleación en estado forjado.

Pese a todo, aún queda mucho camino por recorrer antes de que esta técnica se erija como la preferida para aplicaciones aeroespaciales. En este contexto, la resistencia de los materiales a la fatiga (debilitamiento causado por cargas aplicadas cíclicamente) tiene una importancia similar a su fuerza, si no más. Así pues, hacen falta más estudios para comprender y controlar la resistencia a la fatiga de los materiales obtenidos mediante fabricación aditiva. Otro obstáculo corresponde a la baja velocidad de los procesos actuales de impresión en 3D con metales.

En el ínterin, sin embargo, Martin y su equipo han identificado una estrategia que permite adecuar metales a la fabricación aditiva. Aunque el estudio se llevó a cabo con aleaciones de aluminio, los investigadores apuntan que no resultaría demasiado difícil extender el método a otras de interés industrial, como aleaciones de níquel no soldables, superaleaciones y compuestos intermetálicos. Pero aún podría demorarse un tiempo, pues encontrar inoculantes apropiados para estos materiales no es tarea fácil. Si finalmente se consigue que las superficies de estas aleaciones en polvo sean «funcionales», nos estaríamos aproximando realmente a la impresión en 3D con cualquier metal.

Iain Todd *es investigador en el Departamento de Ingeniería y Ciencia de los Materiales de la Universidad de Sheffield*

Artículo original publicado en *Nature* vol. 549, págs. 342-343, 2017. Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2017

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

Laser powder-bed fusion additive manufacturing: Physics of complex melt flow and formation mechanisms of pores, spatter, and denudation zones. S. A. Khairallah et al. en *Acta Materialia*, vol. 108, págs. 36-45, 2016.

3D printing of high-strength aluminium alloys. John H. Martin et al. en *Nature*, vol. 549, págs. 365-369, 2017.

The influence of porosity on fatigue crack initiation in additively manufactured titanium components. S. Tammas-Williams et al. en *Scientific Reports*, vol. 7, pág. 7308, 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

Imprimir lo imposible. Larry Greenemeier en *IyC*, agosto de 2013.

¿Imprimiremos casas en el espacio? Joaquim Minguella Canela en *IyC*, enero de 2015.

INTERNET

La resiliencia de la Red Oscura

Un estudio logra describir las propiedades estructurales de la «Internet invisible» y explica por qué esta se muestra tan inmune a los ataques informáticos

ALEX ARENAS

Vivimos en una época dominada por la comunicación digital a través de Internet. Sin embargo, ese inmenso volumen de tráfico apenas da cuenta del 10 por ciento de toda la interacción digital existente. El 90 por ciento restante corresponde a comunicaciones a través de redes privadas y a la «Red Oscura», o Darknet, una infraestructura de servicios ocultos a la que no puede accederse desde Internet de la manera habitual. Entre otros fines, esta red ha sido empleada para cometer crímenes informáticos, compartir archivos comprometidos (personales, pornográficos, confidenciales, de *software* ilegal, etcétera) o para la compraventa de bienes o servicios prohibidos.

A finales de los años noventa, unos treinta años después de que se crease el primer prototipo de Internet, la Agencia de Proyectos Avanzados de Investigación para la Defensa (DARPA) y la Oficina de Investigación Naval de EE.UU. se propusieron desarrollar una nueva red de comunicaciones seguras. Esta debía basarse en conexiones anónimas y ser resistente tanto al espionaje como al análisis de su tráfico. El resultado fue la técnica conocida como «enrutamiento de cebolla» (*onion routing*), basada en codificar los datos en «capas» sucesivas de información. Este método permite establecer comunicaciones a través de una red pública, pero manteniendo oculto tanto el contenido del mensaje como las identidades de quienes lo intercambian. Hoy, la infraestructura que hace uso de este protocolo es más conocida como «red Tor», y representa la columna vertebral de la Red Oscura.

Debido al alto régimen de confidencialidad que confiere el uso del protocolo Tor (ignoramos quién se comunica con quién y qué camino sigue la información), hasta ahora ha sido imposible analizar la estructura de la Red Oscura y su capacidad para sobreponerse a ataques informáticos. Hace poco, sin embargo, el Laboratorio de Investigación sobre Internet de la Universidad de California en Los Ángeles publicó algunos datos relativos a las conexiones entre sus nodos (servidores). No obstante, tales datos son parciales: por un lado, solo corresponden a una porción de la Darknet; por otro, no aportan información directa sobre su estructura, por lo que deben procesarse.

En un trabajo realizado el año pasado junto con Manilo De Domenico, por entonces en la Universidad Rovira i



LA RED OSCURA, o Darknet, constituye una gran infraestructura de servicios digitales ocultos a la que no puede accederse desde Internet de la manera habitual. El protocolo que regula su funcionamiento fue concebido para garantizar el anonimato y la imposibilidad de analizar el tráfico de datos, por lo que es usada a menudo con fines ilícitos.

Virgili, propusimos el primer modelo de crecimiento de redes capaz de reproducir las propiedades estructurales que revelan los datos disponibles acerca de la Red Oscura. Ello nos permitió analizar su topología y su resistencia a varios tipos de ataques. Los resultados, publicados en *Physical Review E*, fueron sorprendentes: comparada con Internet, la Red Oscura presenta una robustez estructural muy elevada; es decir, puede seguir funcionando incluso después de haber sufrido numerosos ataques. Más aún, dicha resiliencia emerge de forma automática como consecuencia del protocolo Tor, sin que se haya impuesto mediante diseño.

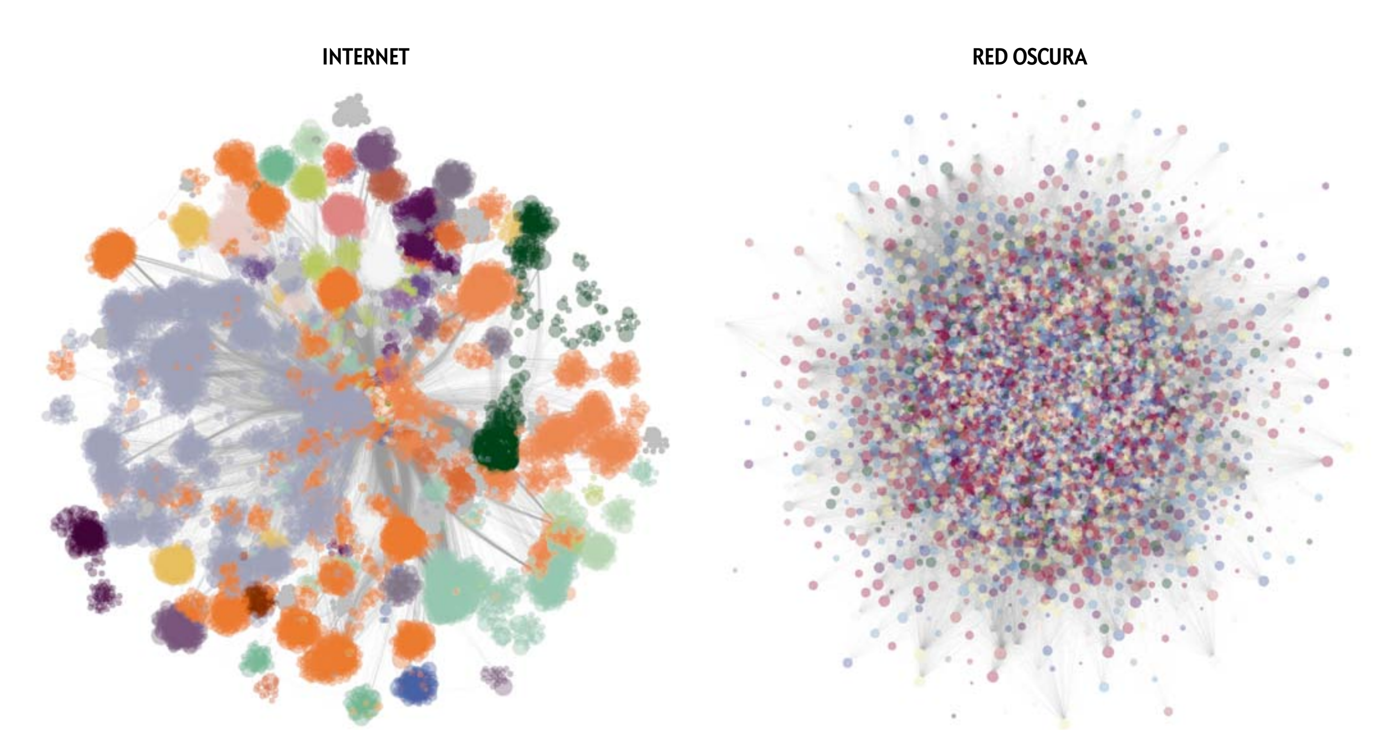
Reconstruir lo invisible

Para modelizar la Darknet hemos de entender primero cómo funciona el protocolo Tor. Cuando un cliente desea conectarse a un servidor, consulta inicialmente un «directorio de autoridades» y obtiene una tabla que proporciona información sobre todos los nodos activos de la red y sus metadatos. Acto seguido estos se evalúan para construir un circuito: una cadena de tres nodos que se emplearán para conectar al cliente con el servidor que aloja el servicio. Esta elección de nodos se halla sujeta a restricciones estrictas. Por ejemplo, los nodos ejecutados por un mismo operador normalmente se evitan; se favorecen aquellos con un mayor ancho de banda, y se da prioridad a los que llevan más tiempo formando parte de la red, los denominados «guardas».

Nuestro modelo de crecimiento parte de una pequeña red aleatoria, la cual no es más que la «semilla» a partir de la cual crecerá el resto de la red conforme a la dinámica del modelo. A cada nodo se le asignan dos variables: su antigüedad (el tiempo que lleva formando parte de la red, el cual crecerá a medida que avanza la iteración) y el ancho de banda (constante en el tiempo para cada nodo y asignada con una distribución de probabilidad dada por los datos empíricos). Estos dos parámetros constituyen las únicas variables del modelo.

A partir de ahí, en cada instante de tiempo ingresan a la red un nodo adicional y M enlaces. Es importante señalar que, a diferencia de otros modelos de crecimiento de redes, dichos enlaces no conectan necesariamente con los nuevos nodos, ya que estos han de aumentar primero su reputación antes de ser considerados confiables. Así pues, los $2M$ nodos (correspondientes a los dos extremos de cada enlace) se seleccionan aleatoriamente con una probabilidad proporcional a su edad y a su ancho de banda.

Tras efectuar 50 ejecuciones aleatorias del modelo y comparar sus propiedades con las que nos brindaban los datos empíricos disponibles, comprobamos que entre ellas existía un elevado acuerdo. En particular, nuestra red se ajustaba bien a una «distribución de grado» (una medida del número de enlaces que llegan a



TOPOLOGÍA PECULIAR: El mismo protocolo que garantiza el anonimato en la Red Oscura parece ser el responsable de su gran homogeneidad y elevada resistencia frente a ataques. Estos esquemas, elaborados a partir de datos de 2015, ilustran la distribución de nodos (servidores) y conexiones en Internet y en la Red Oscura. El tamaño de cada nodo indica cuántos enlaces llegan a él; los colores se han añadido como guía visual. Entre otras peculiaridades, la Red Oscura carece de grandes nodos que regulen el tráfico.

cada nodo) de exponente –1. Ello implica que se trata de una red muy homogénea, y contrasta de manera sorprendente con las distribuciones de grado que encontramos en otras redes tecnológicas o naturales, las cuales suelen presentar exponentes comprendidos entre –2 y –3.

Además de la distribución de grado, existen otros descriptores que caracterizan la estructura de una red compleja. Entre ellos cabe destacar el coeficiente de transitividad, el cual informa sobre el número de triángulos que se observan en las conexiones y que, en la Red Oscura, resulta mayor que en Internet. Esta cualidad nos indica que la Darknet hace gala de una robustez notable, ya que los triángulos dotan de redundancia en las conexiones: si un enlace se elimina, sigue habiendo conectividad entre los tres nodos que forman el triángulo.

Por último, otra propiedad estructural es la conocida como «club de ricos», o *rich-club*. Este hace referencia a la estadística de los nodos que presentan un gran número de conexiones. Su existencia confiere a una red una estructura muy cohesionada al tiempo que centralizada. Ello favorece que unos pocos nodos sean responsables de dicha cohesión y, por regla general, del flujo de información que se transmite en la red. No es este el caso de la Red Oscura, en la que el club de ricos es inexistente.

Resiliencia oscura

Las propiedades estructurales que acabamos de describir implican que la Red Oscura debería resistir mucho mejor los ataques que otras estructuras, como Internet. Para comprobarlo, efectuamos distintos «ataques» sobre los nodos de ambas redes simuladas, Internet y la Darknet, y medimos cómo afectaban a su conectividad.

Los ataques fueron de varios tipos: a nodos aleatorios; a nodos según su importancia medida a partir del número de enlaces; a nodos conforme a su participación en caminos más cortos entre dos puntos cualesquiera, y a nodos que formaban parte del núcleo más central de la estructura. Comprobamos que, en todos los casos, la Red Oscura mostraba siempre un mayor grado de cohesión que Internet bajo el mismo supuesto.

El resultado principal de nuestro trabajo es la constatación de que los mecanismos adoptados para garantizar el tráfico anónimo en la Red Oscura parecen ser los responsables de su peculiar topología y de su resistencia ante ataques e intentos de desmantelamiento. Es cierto que aún existen numerosas limitaciones en la representación de ambos sistemas, Darknet e Internet, por lo que no podemos afirmar conocer con detalle sus verdaderas características topológicas. Sin embargo, nuestro trabajo demuestra que, a partir de los datos disponibles, ya es posible comenzar a pensar en las propiedades de su estructura y en sus implicaciones.

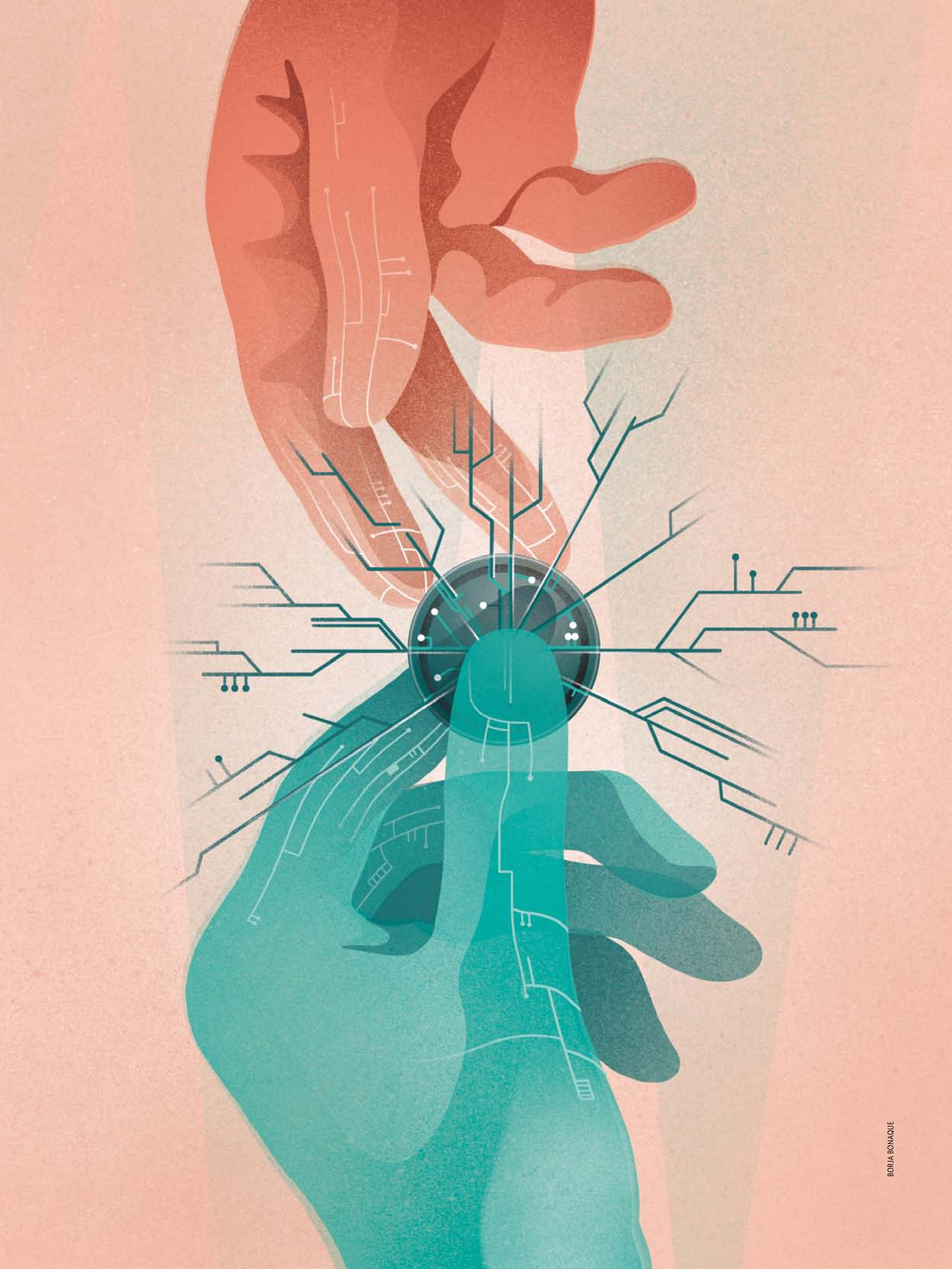
Alex Arenas *investiga en el Departamento de Ingeniería Informática y Matemáticas de la Universidad Rovira i Virgili, en Tarragona*

PARA SABER MÁS

Error and attack tolerance of complex networks. Réka Albert, Hawoong Jeong y Albert-László Barabási en *Nature*, vol. 406, págs. 378-382, 2000.
Networks: An introduction. Mark Newman. Oxford University Press, 2009.
Modeling structure and resilience of the Dark Network. Manilo De Domenico y Alex Arenas en *Physical Review E*, vol. 95, art. 022313, 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

Redes sin escala. Albert-László Barabási y Eric Bonabeau en *IyC*, julio de 2003.
Protección de secretos. Anna Lysyanskaya en *IyC*, noviembre de 2008.



BORJA BONAQUE

EL FUTURO DEL DINERO

INFORME ESPECIAL

El bitcóin fue solo el principio. Las máquinas que gestionan la confianza entre personas tal vez se erijan como solución a los principales defectos del sistema financiero. Pero plantean también preguntas inquietantes. ¿Estamos preparados para un mundo en el que cualquier activo, desde la moneda hasta los datos personales, pueda intercambiarse y quedar registrado en un libro de contabilidad indeleble? ¿Qué ocurriría si una técnica que fue diseñada para restar poder a bancos y Gobiernos termina por otorgarles un control sin precedentes?

—La redacción



HACER SALTAR LA BANCA

NUEVAS REDES FINANCIERAS PODRÍAN DETENER LA CONCENTRACIÓN DE LA RIQUEZA Y FOMENTAR LA PARTICIPACIÓN EN LA ECONOMÍA, PERO SOLO SI SE UTILIZAN CON CUIDADO

ALEXANDER LIPTON Y ALEX «SANDY» PENTLAND

EN SÍNTESIS

El sistema financiero moderno ha alcanzado cotas peligrosas de complejidad. Aumentar la transparencia reduciría los riesgos, pero eso requiere un modelo del circuito monetario con un nivel de detalle que supera la capacidad de la tecnología actual.

Las monedas digitales como el bitcóin y otras técnicas nuevas posibilitan ya simular cada actividad comercial y cada transacción. Estas herramientas podrían servir para crear redes financieras más eficientes y descentralizar el control del dinero. La gente no dependería de los bancos para efectuar transacciones con otras personas.

El potencial para que se produzca una transformación radical es real, pero existen aún muchas incógnitas. Estas redes digitales solo promoverán la equidad y la transparencia si se construyen adecuadamente y se utilizan de forma responsable. Podría ser igual de probable que condujeran a niveles extremos de control centralizado.

BORJA BONAQUE



U

n día de primavera de hace más de 5000 años, en la ciudad mesopotámica de Ur, un comerciante extranjero vendió su mercancía a cambio de un buen montón de plata. No quiso regresar a su hogar cargando con ella, porque sabía que al final de la temporada de cosecha tendría que volver a Ur para comprar grano, de modo que el mercader se dirigió al templo local, donde a menudo se guardaban objetos valiosos, y solicitó al sacerdote que le custodiara la plata.

Poco después, un sobrino del sacerdote le pedía un préstamo. El joven quería comprar semillas para sembrarlas. Así que el sacerdote le prestó parte de la plata, razonando que, si su sobrino no lograba devolvérsela para cuando el mercader la reclamara, podría suplir la cantidad que faltaba, bien con sus fondos personales, bien pidiendo prestado a sus amigos. Mediante la táctica de aprovechar un contrato de larga duración con el comerciante extranjero para cubrir un préstamo a corto plazo a su sobrino, el sacerdote duplicó el número de transacciones comerciales usando dos veces el mismo dinero. En otras palabras, inventó la banca fraccionaria.

Sabemos por los datos arqueológicos que en Mesopotamia tuvo que ocurrir algo similar a esto. Primero, aumentó la productividad global de la economía, porque el sobrino pudo permitirse comprar semillas; segundo, introdujo el riesgo: cabía la posibilidad de que no saldara la deuda a tiempo.

En la Europa del siglo XVII, la aparición de bancos centrales amparados por los Gobiernos conectó este «doble gasto» al sistema tributario. Los reyes pedían préstamos a los comerciantes para combatir en guerras o construir caminos, y los destinaban a pagar a proveedores y tropas. La puesta en circulación de ese dinero generaba actividad económica y beneficios, y a cada paso la cantidad se multiplicaba por dos o más. Los reyes devolvían habitualmente los préstamos gracias a los impuestos con que gravaban las ganancias, lo que estableció un circuito monetario que marcó el inicio del sistema bancario actual.

En su versión más simple, el circuito moderno funciona de la siguiente manera. Primero, las empresas solicitan préstamos a los bancos privados para pagar los salarios y otros gastos; este es el paso en el que se crea dinero. Segundo, los consumidores compran los bienes que producen las empresas o ahorran el dinero depositándolo en cuentas bancarias. Por último, las empresas utilizan sus ingresos para reembolsar a los bancos, lo que completa el ciclo. En esta etapa, la suma prestada al principio se destruye, pero los intereses permanecen para siempre. Es así como los bancos privados revitalizan las economías, sacando dinero «de la nada», si bien este poder se encuentra regulado en parte por los bancos centrales, que imponen límites sobre el capital líquido del que deben disponer las entidades privadas en todo momento para respaldar las actividades crediticias.

Pero ojalá fuera tan sencillo. Por desgracia, el circuito monetario introduce en la sociedad varios problemas fundamentales. Por un lado, crea inevitablemente un puñado de multimillonarios que controla una gran parte de la riqueza. Pero, además, demasiado a menudo se crea dinero ligado a créditos sin tener la suficiente comprensión de los riesgos o despreocupándose de ellos. Esa es la vía que conduce a desastres financieros, como el de 2008: cuando banqueros y políticos espolearon una insaciable demanda de hipotecas, esta se cubrió con un sustancial incremento de la cantidad de dinero creado, a lo que se sumó un aumento aún mayor del riesgo.



Alexander Lipton es fundador y primer ejecutivo de Strong Hold Labs e investigador del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT). Anteriormente desempeñó funciones directivas en el Banco de América, labor que compaginaba con estancias como profesor visitante en la Universidad de Oxford y en el Colegio Imperial de Londres. En el año 2000 recibió el premio Quant of the Year.



Alex «Sandy» Pentland es catedrático del MIT, miembro de las Academias Nacionales de Estados Unidos y uno de los autores más citados en el campo de las ciencias de la computación. En 2011, la revista *Forbes* lo nombró uno de los siete científicos de datos más influyentes del mundo. Su último libro se titula *Social physics* (Penguin Books, 2015).

Puede parecer claro que la culpa la tiene el propio circuito monetario, pero este no constituye la raíz del problema. La creación de dinero mediante el crédito funciona bien siempre y cuando se entiendan y se controlen sus riesgos inherentes, y al mismo tiempo se reduzca la concentración indeseable de riqueza. Hoy en día, sin embargo, una red de factores (una población que no para de crecer, el comercio global y la mayor potencia de los ordenadores) complica demasiado la administración y regulación del sistema, por no hablar de su comprensión.

Lo más preocupante es que para guiar la actividad macroeconómica se recurre a paradigmas obsoletos. Los modelos con que se gestionan la creación de dinero y los tipos de interés, por ejemplo, aún tratan a los bancos privados como meros intermediarios y obvian que son elementos activos, creadores de dinero. Sus estrategias para obtener beneficios inyectan mayor opacidad en el sistema. No es de extrañar que resultase difícil anticipar la crisis de las hipotecas de 2008.

La complejidad del circuito monetario hace que, para entenderlo de verdad, haya que desarrollar modelos con un nivel de detalle sin precedentes. Las limitaciones técnicas han impedido la realización de tan titánica labor. Sin embargo, los macrodatos (*big data*) y el surgimiento de contratos y divisas digitales están transformando la situación. En lugar de servirse de promedios históricos para pronosticar lo que podría ocurrir en cualquier sistema económico, por fin empieza a ser posible llevar a cabo simulaciones completas de cada actividad comercial y transacción individual. La perspectiva de alcanzar semejante logro está sacudiendo las finanzas globales, y sus consecuencias podrían mejorar mucho —o empeorar mucho— la seguridad económica.

EL AUGE DE LAS MONEDAS DIGITALES

Las nuevas técnicas que hacen factible la reinvención del sistema financiero han irrumpido durante el último decenio. El bitcóin representa solo una porción de una industria tecnicofinanciera al alza que se caracteriza por el rumor y la especulación. La invención central consiste en un «libro de contabilidad distribuido», una base de datos compartida y administra-

da por múltiples participantes. Cabe verlo como un sistema digital y comunitario de contabilidad. En él se basan las criptomonedas (monedas encriptadas digitalmente) como el bitcóin. Su estructura de datos subyacente, denominada «cadena de bloques» (*blockchain*), se encuentra contenida en una serie de bloques codificados secuencialmente, los cuales, para garantizar que sean fiables y seguros, se actualizan de manera consensuada mediante diversos mecanismos de autentificación en los que intervienen tanto seres humanos como ordenadores [*véase* «El mundo que el bitcóin ha forjado», por John Pavlus, *en este mismo número*].

Desde un punto de vista conceptual, las cadenas de bloques y la contabilidad distribuida no son una invención reciente; las primeras ocurren de forma natural cuando el poder, un terreno o una propiedad cambian de manos. Lo novedoso radica en casar ambos conceptos en un sistema informático resistente a manipulaciones que puede aplicarse a una amplia gama de problemas prácticos.

Esas herramientas nos permitirían monitorizar y analizar transacciones a un nivel tan granular que por fin lograríamos entender el circuito monetario. Con un grado de claridad totalmente nuevo, podríamos aprender a detectar las señales de alerta temprana que se originan en los billones de transacciones grabadas en el libro contable y a actuar sobre ellas, lo que aumentaría la estabilidad y seguridad del sistema. Este tipo transparente de vigilancia en tiempo real también resulta más seguro para la sociedad en su conjunto. Tras el colapso de 2008 hubo una insuficiente capacidad burocrática para atender las pérdidas individuales de decenas de millones de ciudadanos. Como consecuencia, los organismos reguladores dieron prioridad sobre todo a los grandes bancos, poco numerosos, en vez de centrarse en la gente común, que sufrió más.

Conforme esta técnica evoluciona rápidamente y se expande el espectro de aplicaciones que la explotan, crece la confusión. Debido a que en la actualidad el bitcóin es la moneda virtual más conocida —algunos dirían que con peor reputación—, merece la pena retroceder para explorar sus orígenes y debilidades, así como las diferencias con otras formas de moneda que están estudiándose y que parecen más prometedoras. El bitcóin se diseñó como un sistema de pago digital de igual a igual (P2P, de *peer to peer* o «entre pares») que permite operar sin una autoridad central. Cualquiera puede unirse a ese sistema, lo cual supone tanto una virtud como un defecto. Los usuarios efectúan transacciones financieras unos con otros directamente, sin la ayuda de intermediarios, que se almacenan en una cadena de bloques públicamente distribuida, de modo que, en teoría, todos los participantes pueden verlas. Desde sus inicios en 2009, el bitcóin ha incrementado su valor en varios órdenes de magnitud, por lo que se ha convertido en el blanco favorito de los especuladores.

Las promesas del bitcóin son ambiciosas. Sus defensores esperan que llegue a ser una moneda global y sustituya tarde o temprano a las monedas nacionales,

ILUSTRACIONES DE PETER Y MARIA HOEY

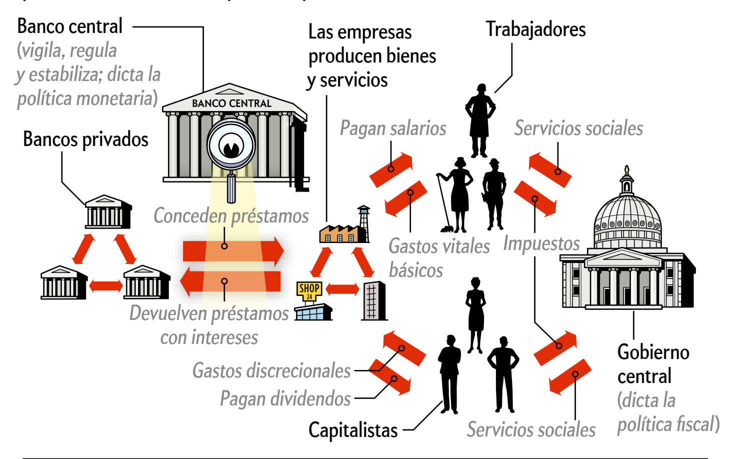
CLASES DE DINERO

Tres tipos de sistemas financieros

Entender el circuito monetario actual se ha vuelto demasiado complicado. Las técnicas emergentes de «cadena de bloques» (*blockchain*), como la que sirve de base al bitcóin, descentralizan (y vuelven más comprensible) el sistema. Nuevas redes se encuentran en desarrollo.

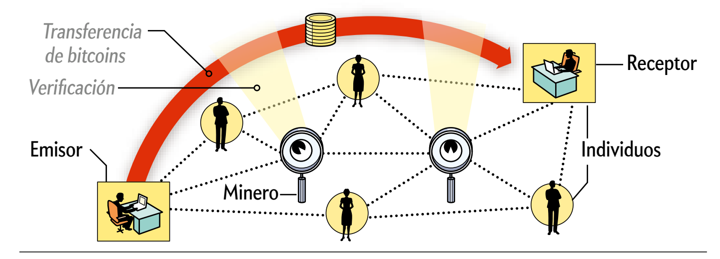
Banca fraccionaria (circuito monetario actual)

Los bancos crean dinero «de la nada» cuando conceden préstamos a las empresas. Estas pagan salarios y dividendos a las familias, que compran bienes y servicios a las empresas. Cuando los préstamos se devuelven, el dinero «creado» se destruye, pero los intereses permanecen en el sistema para siempre.



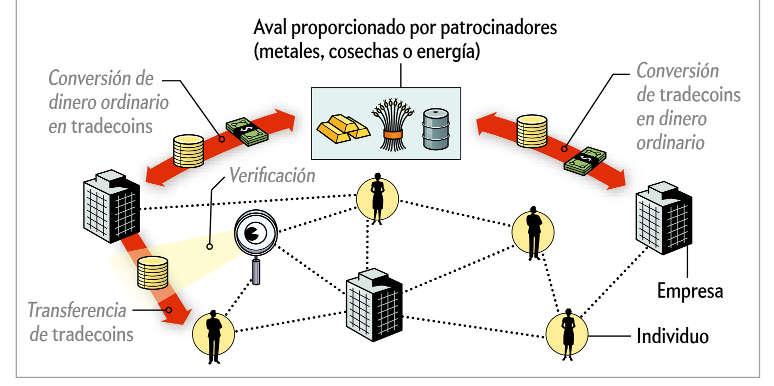
Red de igual a igual del bitcóin

Las transferencias se realizan directamente entre los usuarios, sin intervención de intermediarios designados. Se difunden públicamente y se anotan en una cadena de bloques. El consenso se mantiene gracias a validadores aleatorios. El bitcóin no tiene valor, por lo que su precio es intrínsecamente inestable.



Red de igual a igual del *tradecoin*

Como con el bitcóin, las transacciones se efectúan directamente entre los usuarios y se registran en una cadena de bloques pública. Sin embargo, el consenso se mantiene gracias a validadores designados. El valor del *tradecoin* está respaldado por activos reales suministrados por avalistas, de modo que su precio permanece relativamente estable.





BORJA BONAQUE

que, a su juicio, pueden manipularse con facilidad. Algunos entusiastas incluso consideran el bitcóin como la versión virtual del oro, quizás olvidando que la estabilidad del preciado metal proviene tanto de sus atributos físicos como de los miles de millones de partes interesadas, y que, en el mundo digital, buenas técnicas son desbancadas de forma rutinaria por otras que las superan.

En realidad, el bitcóin no es la primera moneda digital, y es muy probable que tampoco sea la última importante. Además, se ve afectada por restricciones logísticas. El número de transacciones por segundo que se pueden procesar es de unas siete, mientras que Visa alcanza de media unas 2000. Es también un sumidero de energía: la «minería» (el proceso mediante el cual los nodos que componen la red de la criptomoneda compiten para añadir con seguridad nuevas transacciones a la cadena de bloques) requiere una enorme cantidad de electricidad. En aquellos países en los que el coste de la energía es elevado, los mineros se arruinan si no pueden pagar los recibos del consumo eléctrico por todos los cómputos que han de efectuar. Aunque se desconocen las cifras exactas, se cree que el bitcóin consume tanta electricidad como eBay, Facebook y Google juntos. El sistema también se organizó para que la autoridad estuviera repartida entre muchos mineros, pero la concentración en asociaciones gigantescas ha otorgado a un reducido número de grupos el poder suficiente para controlar el sistema del bitcóin. Adiós a la filosofía del igual a igual.

La utilidad del bitcóin también tiene limitaciones. El término «dinero» puede definirse por sus tres tipos de uso: en transacciones, como depósito de valor y como unidad contable. La extrema inestabilidad en el precio del bitcóin frente a cualquier moneda corriente dificulta su uso cotidiano. El bitcóin y el *ethereum*, otra importante moneda digital, no están respaldados por activos del mundo real ni por promesas gubernamentales; por consiguiente, son puramente especulativos. En términos coloquiales, significa que no son dinero «de verdad»: lo que carece de valor puede tener cualquier precio. Algunos entusiastas del bitcóin califican de virtud su naturaleza de no tener valor y afirman que en el futuro todo el dinero será como él. Es muy poco probable que esto ocurra, tanto por razones técnicas como políticas.

Sin embargo, por ser la primera moneda digital descentralizada que ha tenido éxito, el bitcóin constituye un impresionante adelanto. La técnica subyacente y la filosofía de un sistema financiero no regulado, entre iguales, son innovadoras, y el sistema del bitcóin propone soluciones prácticas a grandes problemas. Desde luego, se trata tan solo de una de las posibles aplicaciones de los libros de contabilidad distribuidos basados en una cadena de bloques. La cadena de bloques, al fin y al cabo, es una técnica, no una ideología: no debería confundirse con la filosofía impulsora del bitcóin ni con las motivaciones tras cualquiera de sus aplicaciones. Del mismo modo que exhibe potencial para resolver algunos de los problemas del sistema financiero, también puede reforzarlos. Y teniendo en cuenta que un elemento clave del poder estriba en el control del dinero —tanto el existente como el creado en el futuro—, podemos ya atisbar los riesgos morales encerrados en la caja de Pandora que esta técnica ha abierto.

Considérense los bancos centrales de las principales monedas de reserva, como la Reserva Federal de Estados Unidos y el Banco de Inglaterra. La confianza se asocia a menudo con el tamaño —cuanto más grande, más fiable—, pero estos actores han demostrado lo equivocado de esta idea. En repetidas ocasiones han optado por empobrecer a los «peces pequeños» diluyendo sus obligaciones financieras mediante la inflación, la reducción de los tipos de interés y otras políticas. Recientemente han ensayado tipos de interés negativos y han pensado en formas de prescindir del dinero en efectivo.

Lo más alarmante es que algunos bancos centrales están debatiendo la posibilidad de digitalizar todas sus monedas y anotar las compras directamente en un libro contable. Esto podría sortear la aportación de la banca privada y otorgar a los Gobiernos un control absoluto sobre la economía, lo que también implicaría que estos mantendrían un registro de todo lo que uno comprara, incluidos aquellos artículos que ahora se pagan en efectivo. Países como China, Reino Unido, Singapur y Suecia ya han anunciado planes para estudiar y potencialmente llevar a cabo una estrategia similar. Aunque la técnica en sí se haya diseñado de manera descentralizada, puede utilizarse para crear sistemas controlados centralmente.

HACIA UN SISTEMA FINANCIERO MÁS ESTABLE

La invención de las cadenas de bloques y la contabilidad distribuida no erradicarán problemas como las crisis financieras y las inflaciones malsanas, al menos no a corto plazo. Pero sí permite la aparición de alternativas a la intervención de actores grandes y poderosos. La tecnología actual facilita que se creen sistemas monetarios globales y especializados que, en el pasado, habrían carecido de la dimensión, confianza o estabilidad política necesarias para competir. El próximo paso debería consistir en que los actores pequeños (como las economías emergentes o un buen número de ciudadanos individuales) se asocien para erigir alternativas a los bancos centrales.

Breve historia del dinero

Siglo VII a.C.: En Lidia y en Grecia se acuñan las primeras monedas.

Siglo XIV: Los bancos mercantiles, como el de los Médici, amplían su participación en la industria, el comercio y las finanzas.

Siglo XVII: Con préstamos por valor del dinero depositado, los banqueros aumentan la productividad económica a la vez que generan nuevas fuentes de riesgo, las cuales cristalizan regularmente en accidentes e incluso en depresiones generalizadas. Surgen los bancos centrales, que vinculan la banca con los impuestos.

Siglo XVIII: El patrón oro deriva de tácticas anteriores en las que el dinero circulante se controlaba, de forma no muy precisa, con una reserva de metales preciosos, lo que reducía los riesgos.

Siglo XX: El patrón oro se sustituye por los acuerdos de Basilea, que establecen que guardar activos que se venden con facilidad es igual de bueno que guardar oro.

Con dicha posibilidad en mente, nuestro laboratorio del Instituto de Tecnología de Massachusetts trabaja en la creación de una moneda digital orientada a las transacciones a gran escala. Llamada *tradecoin*, se registrará indeleblemente en una cadena de bloques y estará anclada en todo momento en una cesta de activos del mundo real, tales como cosechas, formas de energía o minerales. Este planteamiento ayudará a estabilizar su valor y fomentará que se confíe en ella. La idea central estriba en que una moneda de uso general necesita tanto la confianza de las personas como sistemas eficientes de transacciones.

Un *tradecoin* digital construido sobre una contabilidad distribuida puede permitir que alianzas entre naciones pequeñas, empresas, comerciantes, uniones de crédito o incluso agricultores reúnan activos suficientes para respaldar una moneda líquida que sea tan digna de confianza y al menos tan eficiente como las monedas nacionales utilizadas por el Banco Mundial y el Fondo Monetario Internacional. Esto brindaría a los miembros de la alianza del *tradecoin* cierta protección contra las políticas egoístas de los grandes actores económicos. La estructura criptográfica les proporcionaría un medio más fácil, seguro y barato de participar en el comercio internacional. Además, en caso de diversidad geográfica y política, los miembros de la alianza gozarían de una mayor inmunidad frente al riesgo de impago que si solo contaran con las garantías de una gran entidad. De hecho, así se fundó el Banco de Inglaterra en 1694: como una alianza de comerciantes.

Por diseño, los principios en que se cimentan monedas como el *tradecoin* difieren de los de criptodivisas como bitcóin, que no se sustentan en activos del mundo real y no presuponen alianzas. El *tradecoin* también evita el proceso de minería y su intensivo consumo de energía, ya que usa una red preaprobada de «validadores» diversos y de confianza. Los participantes pueden seleccionar un conjunto de nodos de verificación con diversidad suficiente para que nadie pueda sobornar simultáneamente al 51 por ciento de ellos. El resultado es un instrumento financiero rápido, aplicable a gran escala, completamente fiable y respetuoso con el entorno. Combina las tecnologías más recientes con la antigua idea de que una moneda de oro posee un valor intrínseco.

Las monedas como el *tradecoin* pueden ser incluso más seguras que las actuales: cabe diseñarlas para que los detalles del circuito monetario resulten visibles y puedan así ser sujetos a supervisión. Aún se necesita una vigilancia ejercida por las partes humanas interesadas, del mismo modo que la ICANN supervisa el sistema de direcciones de Internet o que la Junta de la Reserva Federal supervisa el sistema bancario de Estados Unidos. Dejan margen a una contabilidad distribuida sencilla, lo que se traduce en modelos y predicciones de riesgos más fiables. Hoy en día, este tipo de transparencia resulta imposible debido a la confidencialidad de los contratos y las transacciones financieras. Pero, si en 2008 este sistema hubiera estado en funcionamiento, habría observado que algunos participantes en transacciones financieras tenían una extrema concentración de obligaciones por impago de crédito ligadas a hipotecas y habría «simulado» las consecuencias si variaba el precio de la vivienda. Quizás hubieran aparecido banderas rojas de advertencia.

Estamos abordando el reto de la transparencia. Desarrollamos plataformas para crear sistemas informáticos que constituyan una «red de confianza» que la Unión Europea y las principales compañías financieras de Estados Unidos utilicen a modo de programas piloto. Permitirán el registro y «reproducción» de transacciones y contratos entre las distintas partes sin exponer los datos reservados ni violar la privacidad. Estos programas informáticos son también el núcleo del sistema del *tradecoin*. Estamos explorando cómo se gestionan dos tipos de moneda *tradecoin*: una destinada al comercio internacional, con la garantía de una alianza de naciones pequeñas, y otra respaldada por agricultores para transacciones con mercancías. Estamos reclutando miembros para la alianza a fin de poner a prueba esta idea.

Resulta emocionante la posibilidad de que, por primera vez, existan monedas virtuales globales que sean prácticamente inmunes a las políticas egoístas de los bancos centrales. Es probable que surjan multitud de alternativas y, a la larga, quizás algunas puedan competir con las principales monedas de reserva. Que en la actualidad podamos crear sistemas monetarios verdaderamente comprensibles significa que tenemos el potencial para desarrollar herramientas dirigidas a minimizar riesgos, evitar colapsos económicos y conservar la libertad individual frente a Gobiernos intrusivos y corporaciones demasiado poderosas. Y puesto que estarán respaldados por (y podrán convertirse en) activos tradicionales, poseerán un verdadero valor de referencia, lo cual implica que sufrirán menos ataques especulativos y que resistirán tanto la manipulación política como la inflación causada por los problemas de tal o cual país.

En conjunto, la próxima generación de criptomonedas, como el *tradecoin*, podría reducir drásticamente las fricciones comerciales a nivel mundial, incluso en medio del caos imperante en el actual clima político y económico. Como resultado, las monedas fuertes como el dólar quizá perderían su posición dominante, o bien el sistema financiero de Estados Unidos quizá se comportaría mejor. Cabe esperar que estos sistemas distribuidos, sustentados por alianzas amplias entre diversos actores, puedan aportar al mundo una mayor transparencia, responsabilidad y equidad. IyC

PARA SABER MÁS

The macroeconomics of Central Bank issued digital currencies. John Barrdear y Michael Kumhof. Documento interno n.° 605. Banco de Inglaterra, julio de 2016.

Modern monetary circuit theory, stability of interconnected banking network, and balance sheet optimization for individual banks. Alexander Lipton en *International Journal of Theoretical and Applied Finance*, vol. 19, n.° 6, art. 1650034, septiembre de 2016.

Trust::Data: A new framework for identity and data sharing. Dirigido por Thomas Hardjono, David Shrier y Alex Pentland. Visionary Future, 2016.



EL MUNDO QUE EL BITCÓIN HA FORJADO

LA PRIMERA GRAN MONEDA VIRTUAL NOS HA DEJADO ENTREVER UN NUEVO ORDEN ECONÓMICO QUE GENERA MÁS PREGUNTAS QUE RESPUESTAS

JOHN PAVLUS



John Pavlus es escritor y cineasta especializado en temas científicos y tecnológicos. Sus trabajos han aparecido en *Bloomberg Businessweek*, *MIT Technology Review* y en la colección *The best American science and nature writing*, entre otras publicaciones.

Bitcóin. Criptomonedas. Contratos inteligentes. Muchos han oído hablar de un nuevo ecosistema financiero, pero pocos lo han asimilado. Cientos de bancos centrales y corporaciones están incubando una novedosa técnica, la «cadena de bloques» (*blockchain*), en la que se están invirtiendo miles de millones y que cambiará las reglas del juego. Sin embargo, de todos los profesionales financieros encuestados en 2017 por PricewaterhouseCoopers, solo el 24 por ciento se declaraba «extremadamente» o «muy» familiarizado con ella. Buena parte de la población ni siquiera está segura de que sea legal. Algunos afirman que podría tumbar sistemas económicos enteros; otros, como Emin Gün Sirer, de la Universidad Cornell, critican que, si bien resulta fascinante y rompedora, también se dicen de ella todo tipo de insensateces. Pero ¿qué es una cadena de bloques?

Todo empieza con un multimillonario oculto bajo el pseudónimo de Satoshi Nakamoto. En octubre de 2008, Nakamoto publicó a través de una oscura lista de correo un artículo en el que detallaba el diseño de la primera cadena de bloques: una base de datos pública y distribuida que se sincronizaría cada 10 minutos en miles de ordenadores. Cualquiera podría acceder a ella, pero nadie la podría piratear. ¿Su propósito? Proporcionar un registro de cambio blindado y descentralizado para una nueva moneda digital: el bitcóin.

Hasta ese momento, el problema con el dinero electrónico radicaba en que nadie podía asegurar que no se usaría dos veces. La cadena de bloques cambió eso, ya que cada transferencia se anota en un «libro de contabilidad» distribuido: una especie de hoja de cálculo que, gracias a las matemáticas y la criptografía, es más inalterable que una roca grabada con cincel. *The Economist* la bautizó como «la máquina de la confianza».

La técnica de la cadena de bloques creció con rapidez. Piense en ella como en un andamio capaz de albergar cualquier dato que requiera seguridad: historiales financieros, documentos de propiedad, certificados de identidad. Este «libro de contabilidad mundial», como lo denomina Don Tapscott, coautor de *Blockchain revolution*, es una *tabula rasa*. Pero puede usarse también con fines perversos, por lo que no faltan voces que intentan moderar el delirio. He aquí una guía del paisaje digital al que Satoshi Nakamoto, quienquiera que sea, nos ha empujado.

CONCEPTOS BÁSICOS

CRIPTOMONEDA: Moneda virtual que usa técnicas criptográficas para controlar cuándo se generan las unidades de la divisa y para garantizar la transferencia segura de fondos.

RED DE IGUAL A IGUAL (P2P, DE *PEER TO PEER*): Red descentralizada de ordenadores, por lo que cualquiera de ellos puede comunicarse con cualquier otro sin pasar por un servidor central ni por un administrador. Napster, la plataforma creada a finales de los noventa para compartir archivos de música, popularizó el concepto.

NODO: Cada ordenador conectado a una red P2P. La red Bitcoin se compone de miles de nodos repartidos por todo el mundo.

LIBRO DE CONTABILIDAD DISTRIBUIDO: Lista de transacciones con marcas de tiempo que se difunde, copia y confirma simultáneamente a través de múltiples ordenadores de una red P2P. Si cada nodo posee una copia del libro, los errores y falsificaciones pueden detectarse con facilidad.

BLOQUE: Agrupación de transacciones individuales en una cadena de bloques. En la red Bitcoin se incorporan nuevos bloques a la cadena cada 10 minutos.

MÉTODO DE DISPERSIÓN (*HASHING*): Método criptográfico que usa una función llamada *hash*, o «función resumen», que condensa cualquier cantidad de datos en un una cadena alfanumérica de longitud fija. Ello genera una «huella digital» de los datos de partida: si uno solo de sus bits se modifica, el resultado de aplicar la función *hash* será completamente distinto, lo que facilita detectar errores o manipulaciones en los datos originales. El método es unidireccional: los datos iniciales no pueden recuperarse a partir de la huella digital.

MINERÍA: Proceso por el que los nodos de una red de criptomonedas compiten entre sí para añadir de manera segura nuevos bloques a la cadena. La recompensa consiste en unidades de la moneda, por lo que esta se convierte en un incentivo financiero para garantizar la seguridad. La minería implica descargar la última versión de la cadena de bloques y verificarla; después, se aplica un algoritmo de fuerza bruta para buscar la solución a un difícil acertijo matemático generado mediante *hashing*. El primer nodo que lo consigue «extrae» el bloque, lo añade a la cadena y obtiene la recompensa. La competición no depende de la habilidad del usuario: cuanta más potencia de cálculo se invierta, mayor será la probabilidad de hallar la solución; un proceso conocido como «prueba de trabajo».

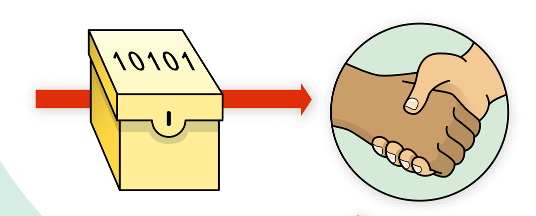
ILUSTRACIONES DE PETER Y MARIA HOEY

ASÍ FUNCIONA UNA CADENA DE BLOQUES

¿Cómo circulan las monedas virtuales —o cualquier otro dato— por una red descentralizada y repleta de extraños que no tienen ninguna razón para confiar unos en otros? Generando un registro permanente de transacciones que no puede ser modificado por ningún miembro de la red.

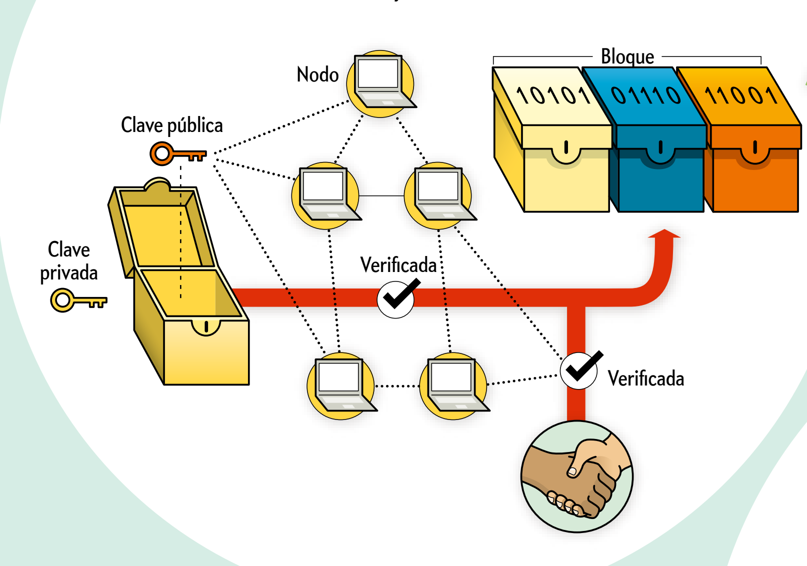
1

Una transacción se inicia cuando una parte accede a enviar datos a otra. Los datos pueden ser de cualquier tipo, pero, dado que una cadena de bloques persigue crear un registro permanente y verificable de una operación de intercambio, suelen representar algún activo valioso. Ejemplos típicos son unidades de criptodivisas; contratos, escrituras o títulos de propiedad; información médica o datos personales.



2

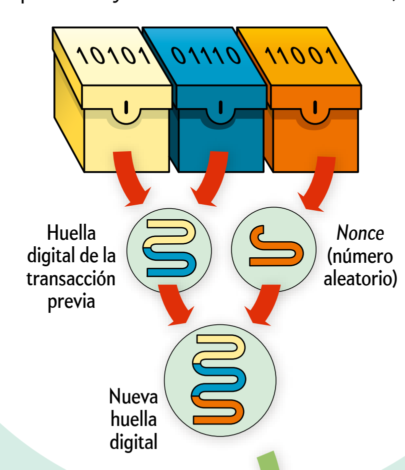
Para confirmarla, la transacción se difunde en una red P2P de ordenadores que manejan la cadena de bloques. Cada nodo dispone de un procedimiento para comprobar la validez de la transacción. (En una con bitcoins, por ejemplo, la red verificaría si el pagador realmente tiene los que afirma tener.) Una vez que la red ha alcanzado el consenso, los algoritmos empaquetan en un bloque la transacción junto a otras recientes.



3

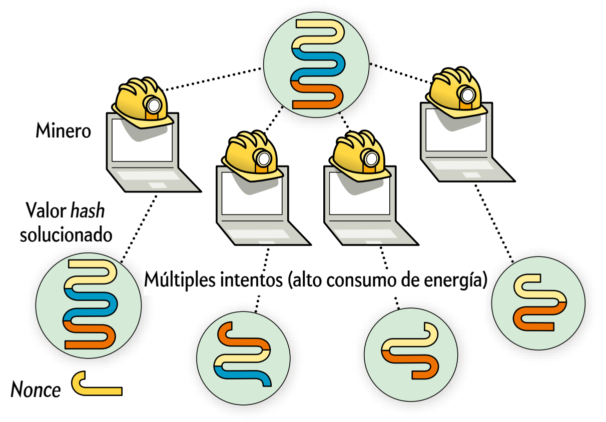
El programa crea una «huella digital» del nuevo bloque codificando sus datos mediante una función *hash* y dos elementos más: la huella digital del bloque anterior y un número aleatorio de uso único (*nonce*).





4

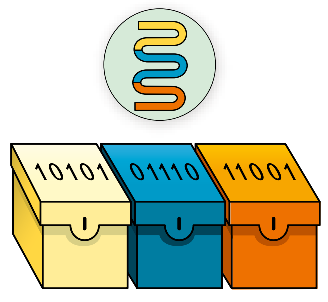
Ciertos nodos, apodados «mineros», comienzan a competir entre sí para añadir el nuevo bloque a la cadena. Sus ordenadores ejecutan un tedioso conjunto de cálculos que, por ensayo y error, intentan resolver un problema matemático arbitrario definido por la red. (En el protocolo Bitcoin, los mineros buscan valores *hash* que contengan un cierto número de ceros al principio.) Quien primero complete esta prueba de trabajo y logre hallar la solución «extrae» ese bloque y obtiene una recompensa económica.



ALTERNATIVA: La minería basada en pruebas de trabajo requiere mucha energía, por lo que ya hay cadenas de bloques que prescinden de ella. En su lugar, usan una red de nodos «validadores», los cuales certifican las transacciones mediante un proceso denominado «prueba de participación». Dado que este no implica cálculos laboriosos, consume mucha menos electricidad.

5

El bloque validado se añade a la cadena con una huella digital en la que también se codifican las huellas validadas de los bloques previos. Estas huellas anidadas aumentan progresivamente la seguridad de la cadena conforme se van agregando nuevos bloques, ya que modificar un solo bit en cualquier parte de la cadena no solo alteraría la huella digital de ese bloque concreto, sino también las de los posteriores.



LA CADENA DE BLOQUES, DESMITIFICADA

PREGUNTAS FRECUENTES SOBRE UNA TÉCNICA EN EXPANSIÓN

1. ¿SON LO MISMO BITCÓIN Y *BLOCKCHAIN*?

No, pero es fácil confundirlos, ya que ambos se hicieron públicos en 2008, cuando Satoshi Nakamoto publicó el artículo en el que describía cómo implementarlos a la vez. El bitcóin es un tipo de criptomoneda. La «cadena de bloques» (*blockchain*) es la técnica que hace posible el protocolo Bitcoin: una infraestructura que permite mantener un registro de todo tipo de transacciones. La cadena de bloques existe sin el bitcóin, pero no a la inversa. Puede pensarse en el bitcóin como en una «aplicación» que se ejecuta sobre una cadena de bloques, de forma un tanto similar a como la Red se ejecuta sobre Internet.



2. ¿DE DÓNDE PROCEDE EL VALOR DE UNA CRIPTOMONEDA?

Algunos afirman que el bitcóin posee valor gracias a su seguridad (su cadena de bloques nunca ha sido pirateada) o a su «escasez», impuesta matemáticamente (una reserva fija de 21 millones de bitcoins implica que nunca podrán devaluarse «imprimiendo más dinero»). Otros opinan que su valor es intrínseco, ya que la minería constituye una labor tediosa que fortalece la red. Pero ¿y las criptomonedas que no exigen minería? Según Christian Catalini, del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), «el valor surge del consenso; todos coincidimos en que posee valor». En este sentido, quizá las criptomonedas tengan más en común con las redes sociales que con los bancos centrales. «El dinero es un medio para que la sociedad lleve un control de cuentas y saldos», apunta. Si las criptomonedas terminan facilitando el seguimiento de la información, su valor estará garantizado, tanto si representan un activo físico como un simple número.

3. ¿SON LAS CADENAS DE BLOQUES UNA NUEVA INTERNET?

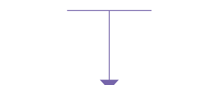
No exactamente, ya que las cadenas de bloques necesitan Internet para mantener su red P2P. Además, cuando la gente habla en términos informales de «la» cadena de bloques, casi siempre se refiere al sistema específico que Nakamoto ideó para el bitcóin. Este fue el primer sistema de contabilidad distribuida que no necesitaba el respaldo de un servidor centralizado ni de una organización. Y continúa siendo de los mayores: en noviembre de 2017 almacenaba más de 130 gigaoctetos de información, un tamaño que aumenta con cada nueva transacción. Con todo, esta cifra es aún muchos órdenes de magnitud inferior a la cantidad de datos en Internet, la cual se estima en la escala de los yottaoctetos (10^{15} gigaoctetos).

4. ¿SON LEGALES LAS CADENAS DE BLOQUES?

Sí. Pero su naturaleza descentralizada y su asociación con el bitcóin (que se ha empleado en operaciones ilegales, como el tráfico de drogas y armas) pueden otorgarles una reputación de «proscritas» que no necesariamente merecen. Las cadenas de bloques pueden destinarse a numerosos propósitos buenos y malos, al igual que Facebook o el correo electrónico.

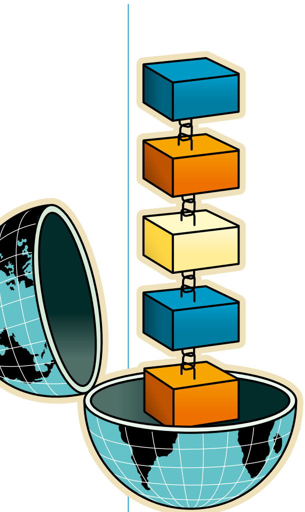
5. ¿CÓMO SE CONSIGUE QUE LAS CRIPTOMONEDAS SEAN SEGURAS?

Dado que en el fondo se trata de *software*, la fiabilidad de una criptomoneda «deriva del código base», explica Catalini, del MIT. Cualquiera puede concebir una y obtener financiación a través de una oferta inicial; incluso Paris Hilton lo hizo, cediendo su nombre para promocionar una oscura ficha digital. Pero no parece una coincidencia que las dos criptodivisas más populares, el bitcóin y el *ethereum*, fueran diseñadas por programadores expertos. Dicho esto, incluso las monedas con una excelente reputación técnica entrañan riesgos. La DAO, una «organización autónoma descentralizada» que funciona con Ethereum y que en 2016 recaudó más de 100 millones de dólares, tenía una vulnerabilidad que permitió a los piratas informáticos hacerse 50 millones de dólares en *ethereum*.



10 %

Porcentaje del PIB mundial que en 2025 se almacenará en cadenas de bloques, según un informe del Foro Económico Mundial de 2015.



¿QUIÉN USA LAS CADENAS DE BLOQUES?

No son solo ciberlibertarios y expertos en finanzas. He aquí una lista incompleta:

- **BANCOS:** Varios bancos y sociedades de inversión globales están desarrollando proyectos basados en cadenas de bloques. Desde 2012, Ripple se ha convertido en un floreciente sistema para liquidar transacciones internacionales entre entidades. Y empresas como Bloom intentan aplicar cadenas de bloques a los informes de crédito para acabar con las filtraciones de datos, como la sufrida por Equifax.
- **GOBIERNOS:** En EE.UU., los estados de Delaware e Illinois usan registros distribuidos para los certificados de nacimiento; en Vermont, la ley permite verificar documentos legales mediante cadenas de bloques. Dubái las ha integrado en servicios administrativos, como la expedición de licencias. En 2016, Túnez empezó a emitir una versión virtual de su moneda nacional, el eDinar, sustentada en cadenas de bloques.
- **TECNOLÓGICAS:** La red Ethereum (que nació como recurso para nuevas aplicaciones y no solo como un ecosistema de dinero virtual) viene a ser una «App Store» para empresas. Cientos de proyectos funcionan con ella. Uno destacado es WePower, que busca que los propietarios de viviendas puedan comprar y vender energía renovable (de placas solares en los tejados, por ejemplo) negociando directamente unos con otros.
- **ARTISTAS:** La cantante británica Imogen Heap fundó Mycelia, una incubadora tecnológica que identifica los metadatos ligados a creaciones artísticas y elimina intermediarios como iTunes.
- **GRUPOS DE AYUDA HUMANITARIA:** La Fundación BitGive está promoviendo la transparencia de las donaciones filantrópicas. El Programa Mundial de Alimentos de la ONU está perfeccionando el seguimiento de la ayuda a los refugiados sirios en Jordania.
- **INSTITUCIONES ACADÉMICAS:** El proyecto Blockcerts busca que las credenciales académicas y profesionales sean más fidedignas y compartibles.
- **GESTORAS:** Everledger, con sede en Londres, ha puesto la mirada en la industria del diamante con un registro de los atributos y la procedencia de cada joya. También se están efectuando seguimientos de vinos de calidad y de obras de arte.
- **PERIODISTAS:** Para luchar contra las noticias falsas, Civil ofrece a los redactores una plataforma de periodismo independiente, libre de publicidad, inmune a intereses externos (Rusia, Facebook) y financiado por los lectores.
- **GENTE CORRIENTE:** A los inmigrantes les resulta más barato enviar dinero a sus países de origen usando la red Bitcoin que mediante Western Union. Se calcula que un 20 por ciento de los giros entre Corea del Sur y Filipinas dependen de este sistema.

77 %

Fracción de la industria de servicios financieros que hacia 2020 habrá adoptado las cadenas de bloques como parte de un proceso o sistema productivo, según la compañía PwC.

¿ES EL BITCÓIN EL FUTURO O FLOR DE UN DÍA?

El bitcóin es la moneda virtual más popular del mundo. Sin embargo, también está sujeta a una salvaje especulación: su valor se ha multiplicado por 10 desde 2016, pero en septiembre de 2017 perdió en dos semanas el 40 por ciento, aunque después lo recuperó —y lo superó— con la misma celeridad (y quién sabe lo que ocurrirá cuando lea estas líneas). Para algunos, las limitaciones técnicas de la red (su lentitud) y los insostenibles costes del proceso de minería la convierten en una bomba de relojería. «No apostamos por el bitcóin», asegura Charlie Morris, director de inversiones de NextBlock Global, una firma que invierte en cadenas de bloques.

El bitcóin ha legitimado los aspectos básicos de una criptomoneda global. Pero puede que su sucesora en importancia tenga una mayor capacidad para mantenerse: en palabras de Morris, el *ethereum* no es tanto una forma de dinero como un «activo de cadena de bloques», el cual sirve de motor de la red Ethereum. Al igual que los programadores alquilan servidores en la nube de Google, quienes quieran desarrollar aplicaciones usando la cadena de bloques de Ethereum deben pagar en *ethereum*. Cuanto más útil sea su plataforma, más estable y valiosa será la criptomoneda. Y es muy probable que surjan nuevas divisas y protocolos; la carrera no ha hecho más que comenzar.

¿POR QUÉ USAR UNA CRIPTODIVISA EN VEZ DE UNA MONEDA NACIONAL?

Imagine un billete de 100 dólares que solo permite comprar productos por valor de 50. Así ocurre en Venezuela, donde la moneda oficial se está derrumbando. «Cada año, la mitad de los ingresos netos se pierde por la hiperinflación», asegura Charles Morris, de NextBlock Global. «Para evitarlo, la gente compra bitcoins.»

¿Por qué una criptomoneda que resulta difícil de entender y que carece de un Gobierno que respalde su valor tendría que parecer mejor apuesta que un bien valioso y tradicional, como el oro? Por un lado, convertir bolívares venezolanos en bitcoins es mucho más fácil: cualquier persona con acceso a Internet puede hacerlo. Y, dado que el bitcóin no tiene forma física, no hace falta esconderlo en lugares inseguros, como un colchón o, en el caso de Venezuela, en el banco. Por supuesto, el bitcóin no tiene un valor estable. Pero mientras que el bolívar se ha hundido, la moneda virtual sigue una tendencia al alza. En un país donde el FMI calcula que en 2018 la inflación superará el 2300 por cien, parece razonable asumir ese riesgo.

Los zimbabuenses tienen el problema opuesto. Tras abandonar su propia moneda por el dólar estadounidense, el país depende de las importaciones de divisas y ahora se enfrenta a la escasez. El bitcóin se ha vuelto tan común que incluso se acepta en los concesionarios de automóviles.

¿ES EL FIN DEL DINERO EN EFECTIVO?

Quizá parezca que el dinero impreso correrá la misma suerte que los periódicos, pero los expertos aseguran que no está ni mucho menos muerto. «Aún gastamos grandes cantidades de papel en pagar cosas como el envío internacional de contenedores marítimos», señala Vinay Gupta, director de Mattereum, una firma de servicios legales especializada en contratos inteligentes. El problema con el bitcóin y el *ethereum* radica en que no se aceptan en muchos lugares, por lo que no pueden competir con el dinero en efectivo.

En países como Kenia, donde pocos tienen una cuenta bancaria tradicional y donde los servicios de «dinero móvil» han hecho que ahorrar y enviar fondos por teléfono sea mucho más fácil que canjear efectivo, quizá parezca que las criptomonedas irían como anillo al dedo. Pero la minería aún requiere una elevada potencia de procesamiento, un recurso escaso en África, donde abundan los móviles de gama baja y pocos disponen de un ordenador. Los cálculos necesarios para operar en cadenas de bloques podrían, en teoría, realizarse en «la tarjeta SIM de un viejo Nokia», dice Gupta. Aun así, el dinero en efectivo tardará en desaparecer.



3 4 5

3

¿SON LAS CADENAS DE BLOQUES UNA NUEVA INTERNET?

4

¿SON LEGALES LAS CADENAS DE BLOQUES?

5

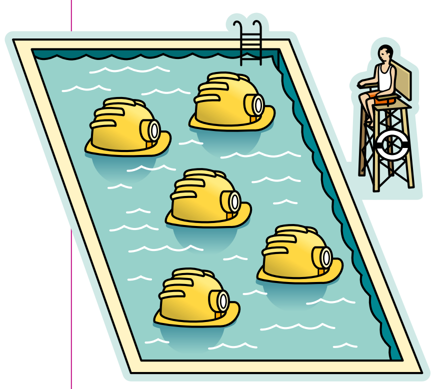
¿CÓMO SE CONSIGUE QUE LAS CRIPTOMONEDAS SEAN SEGURAS?

SI LAS CRIPTOMONEDAS SON DIGITALES, ¿CON QUÉ FUNCIONAN?

Que las criptomonedas no posean atributos físicos no significa que su uso no cueste nada. El proceso, intencionadamente fatigoso, de extraer bitcoins mediante minería (la manera de anotar nuevas operaciones en el libro de contabilidad) requiere que la red P2P entera ejecute un número impresionante de cálculos para validar la cadena de bloques. Todo ese procesamiento consume energía.

¿Cuánta? Empecemos con el número de cálculos. A finales de 2017, la red Bitcoin rondaba los 10 trillones de cálculos por segundo. Esa cifra no permite obtener una estimación precisa de la energía empleada, porque la red, al estar descentralizada, no contempla los nodos individuales. Pero algunos estudios fiables fijan su consumo anual de electricidad en unos 27 teravatios hora, similar al de toda Irlanda. Para ponerlo en perspectiva, producir los bitcoins de un año requiere el equivalente a quemar 10 millones de toneladas de carbón, las cuales emiten a la atmósfera unos 26 millones de toneladas de CO_2. Para alimentar la red Bitcoin con energía solar, habría que usar más de la mitad de la capacidad anual de EE.UU.

El creador de Ethereum, Vitalik Buterin, está implementando un mecanismo de validación distinto, llamado «prueba de participación», que no requiere minería. Es poco probable que en un futuro cercano la red Bitcoin, mayor y más descentralizada, dé un paso similar. Pero Vinay Gupta, quien diseñó la estrategia de cadena de bloques de Dubái, cree que la misma codicia que motiva a los mineros a convertir kilovatios en criptomonedas al final los incitará a buscar una solución. El inversor de capital riesgo Charlie Morris piensa que, cuando las criptomonedas basadas en pruebas de participación demuestren su eficacia, «la minería quedará como una anécdota histórica».



¿DÓNDE SE LLEVA A CABO LA MINERÍA?

71%

Porcentaje de bitcoins «extraído» por el mayor productor, China. El siguiente país es la India, con un 4 por ciento. Un consejo: no intente hacer minería de bitcoins en casa. La tarea está hoy dominada por equipos gigantescos, por lo que la probabilidad de que un nodo aislado resuelva un bloque es aproximadamente de uno entre ocho millones. Un operador solitario gastaría en electricidad mucho más de lo que ganaría. ¿Desea practicar como aficionado? Únase a un grupo público.

¿QUÉ OPINA LA SOCIEDAD DE LAS CADENAS DE BLOQUES?

62%

Fracción de los estadounidenses que creen que las criptomonedas se usan en compras ilegales o desconocen para qué sirven, según una encuesta de YouGov de 2017.

59%

Porcentaje de consumidores que, en una encuesta global realizada por HSBC en 2017, no habían oído hablar de las cadenas de bloques. El 80 por ciento de quienes sí habían oído hablar de ellas no sabían lo que eran.

39%

Fracción de los ejecutivos sénior de grandes compañías de EE.UU. con poco o ningún conocimiento sobre cadenas de bloques, según una encuesta realizada por Deloitte en 2017.

¿CÓMO SE USARÁ ESTA TÉCNICA EN EL FUTURO?

Quienes desarrollan proyectos basados en cadenas de bloques son, por definición, futuristas. Una vez que la técnica abandone su fase de pruebas, ¿qué podría crearse con ella?

- **VEHÍCULOS AUTÓNOMOS:** Su coche circulará solo mientras usted trabaja o duerme. En vehículos compartidos, los contratos sustentados en cadenas de bloques eliminarían a intermediarios como Uber automatizando sus dos funciones básicas: enlazar coches con pasajeros y facilitar los pagos. Usted también podría poseer «acciones» de un vehículo, representadas por fichas de criptomonedas.
- **DATOS MÉDICOS:** La misma técnica que permite que dos extraños intercambien bitcoins podría también ofrecer información médica otorgando al paciente un firme control, apunta Brian Behlendorf, director del proyecto Hyperledger de la Fundación Linux. Los pacientes recibirían una «cartera de salud» con su historia y sus datos. Un médico podría acudir al registro y solicitar el tipo de sangre mediante una petición de acceso al teléfono del usuario. «Tendríamos una lista de las personas con quienes hemos compartido los datos y la opción de eliminarla cuando finalizara el tratamiento», explica Behlendorf.
- **UN SUPERORDENADOR GLOBAL:** Vincular sus dispositivos electrónicos a otros en una red P2P y recibir un pago por permitir su uso a través de una cadena de bloques crearía un incentivo para financiar un superordenador mundial descentralizado. Mientras usted duerme, un científico alquilaría su portátil y su teléfono para ejecutar una simulación. Un proyecto denominado Golem ya trabaja en su desarrollo. «Los ordenadores portátiles en reposo superan con creces en capacidad informática a los centros de datos», indica Gupta. «La inteligencia artificial, los modelos climáticos... todo eso podría acelerarse en un factor de mil.»

4

¿CUÁLES SON LAS LIMITACIONES Y LOS PELIGROS?

«Las cadenas de bloques aportan un sustrato que resulta muy difícil de modificar *ex post facto*», indica Emin Gün Sirer, de Cornell. «Pero eso no significa que todo lo que se grabe sea cierto o deseable. Si alguien me roba mis criptomonedas, me gustaría poder deshacer esa transacción. Es ahí donde la inmutabilidad se convierte en un lastre.» También es fácil confundir la inmutabilidad teórica de una cadena de bloques con la seguridad de los datos: las cadenas de bloques públicas, como Ethereum y Bitcoin, en realidad no encriptan ninguna información. Brian Behlendorf, de la Fundación Linux, va más allá: «El registro nunca debería usarse para almacenar datos personales o delicados, ni siquiera si se cifran, ya que, sea lo que sea lo que encriptemos hoy, dentro de 40 o 50 años podremos piratearlo». Algunos partidarios de la cadena de bloques hablan de ella como de la panacea para resolver cualquier problema social relacionado con una cuestión de confianza, pero su optimismo les ciega. [*Para un análisis de estas limitaciones, véase el artículo de Natalie Smolenski, en la pág. 30.*]

¿CÓMO SE REGULA UN SISTEMA DESCENTRALIZADO?

Dada la reputación de Salvaje Oeste de las monedas virtuales, es fácil imaginar que se crearon para evitar la regulación financiera. Pero eso no es del todo exacto. Los bitcoins están repletos de regulaciones, solo que estas son definidas y aplicadas por un código fuente en vez de por un Gobierno o un banco central. «La innovación del bitcóin estriba en romper con la gobernanza social de los registros», asegura Patrick Murck, jurista de Harvard experto en regulación de las cadenas de bloques. El propósito de Ethereum, apoyar la expansión de los contratos inteligentes, es en esencia regulatorio. Podría afirmarse que una cadena de bloques no es sino una regulación: un sistema de normas impuestas matemáticamente sobre lo que puede hacerse y lo que no con una base de datos.

Lo importante de la regulación financiera, descentralizada o no, es quién se encarga de ella y cómo lo hace. «En un sistema descentralizado no hay ningún lugar concreto al que ligar la regulación; pero, dondequiera que aparezca una intermediación, surgirá una normativa», señala Murck. En 2013 China excluyó las criptomonedas de su sistema bancario, y en septiembre de 2107 prohibió los intercambios nacionales de bitcoins. Japón y EE.UU. están intentando regular los mercados de criptodivisas y las «ofertas iniciales de moneda» sometiéndolos a la misma vigilancia que a las operaciones bursátiles y la banca de inversión.

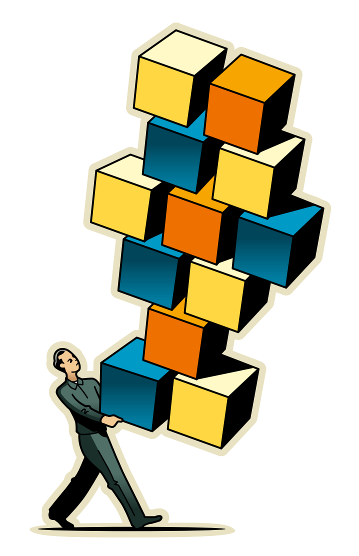
Una futura aplicación de las cadenas de bloques será salvaguardar los registros de identidad digital. Y, según el inversor de capital riesgo Charlie Morris, quizá surjan criptomonedas que liguen estos datos con los financieros. No tendrían el anonimato del bitcóin (Morris no cree que el número de propietarios de bitcoins que paguen los impuestos asociados pase de unos pocos cientos), pero, a medida que el dinero digital se generalice, la percepción de seguridad y estabilidad puede llevar a que se tolere o incluso se reclame cierto grado de supervisión. Murck añade: «Si yo le confío a usted una propiedad para que la guarde en mi nombre y realice transacciones con ella, entonces, o ya existe la regulación, o está a punto de llegar».

5

¿PUEDEN FALLAR LAS CADENAS DE BLOQUES?

Hasta la fecha, la red Bitcoin (la primera del mundo y, por ahora, la mayor y más utilizada) nunca ha estado comprometida ni se ha pirateado. Sin embargo, eso no significa que las cadenas de bloques sean invulnerables. «La tecnología perfecta no existe», recuerda Gün Sirer, investigador de Cornell y codirector de la Iniciativa para Criptomonedas y Contratos. He aquí tres brechas en la armadura de una cadena de bloques:

ATAQUE DEL 51 %: La seguridad de una criptomoneda depende de dos recursos inagotables: la velocidad y la codicia de sus mineros. Pero, en teoría, es posible derrotar a ambos. Para subvertir el mecanismo de consenso de la cadena de bloques, los atacantes tendrían que controlar la mayoría de los nodos; ello les permitiría decidir qué bloques se extraen y cómo. Podrían deshacer transacciones, lo que les facultaría para usar una misma moneda dos veces, así como evitar que se validaran transacciones de terceros. Es poco probable que la red Bitcoin, compuesta por miles de nodos repartidos por todo el mundo, sufra un ataque así. Sin embargo, otras criptomonedas más modestas sí corren peligro: una de ellas, *krypton*, fue atacada en 2016 por un grupo llamado The 51 Crew. Incluso las cadenas de bloques que no recurren a la minería son vulnerables, ya que siguen basadas en la premisa de que la mayoría de sus nodos no son hostiles.



ERROR HUMANO: Comprometer una cadena de bloques podría requerir el equivalente computacional de mover montañas, pero todo lo vinculado a esta técnica seguirá siendo tan vulnerable como antes. En 2014, Mt. Gox, una casa de cambio de bitcoins, fue presa de una mala administración y perdió el equivalente a 620 millones de dólares. En última instancia, una cadena de bloques es un libro de contabilidad distribuido sin servicio de atención al cliente, de modo que si tenemos una cartera llena de bitcoins y perdemos la contraseña, ese dinero casi con certeza desaparecerá. Hay una exquisita ironía en el hecho de que algunos usuarios guarden una copia impresa de sus códigos de acceso —o incluso unidades USB donde almacenan la moneda misma— en la caja fuerte de un banco, una práctica apodada «almacenamiento en frío».

EXPLOSIÓN DE DATOS: No se trata tanto de una vulnerabilidad como de una consecuencia natural del buen funcionamiento del sistema. Dado que, en esencia, cada nuevo bloque revalida todos los anteriores, cada nodo de validación necesita una copia de la última versión de la cadena completa para procesar cada nueva transacción. Con 130 gigaoctetos y creciendo, la cadena de bloques de Bitcoin está comenzando a tornarse inmanejable. Y el registro de Ethereum, diseñado para ofrecer una mayor flexibilidad, ya supera en tamaño al de Bitcoin. Si todo el mundo comenzara a usarlo, puede que solo los ordenadores de alto rendimiento fuesen capaces de soportar la carga, lo que sería contrario al propósito inicial de disponer de un libro de contabilidad distribuido.

EL IMPACTO SOCIAL DE LAS CADENAS DE BLOQUES

EL FUTURO DEL DINERO



¿PERMITIRÁ ESTA NUEVA TÉCNICA RESTAURAR LA CONFIANZA EN EL SISTEMA ECONÓMICO?



NATALIE SMOLENSKI



BORJA BONAQUE

EN SÍNTESIS

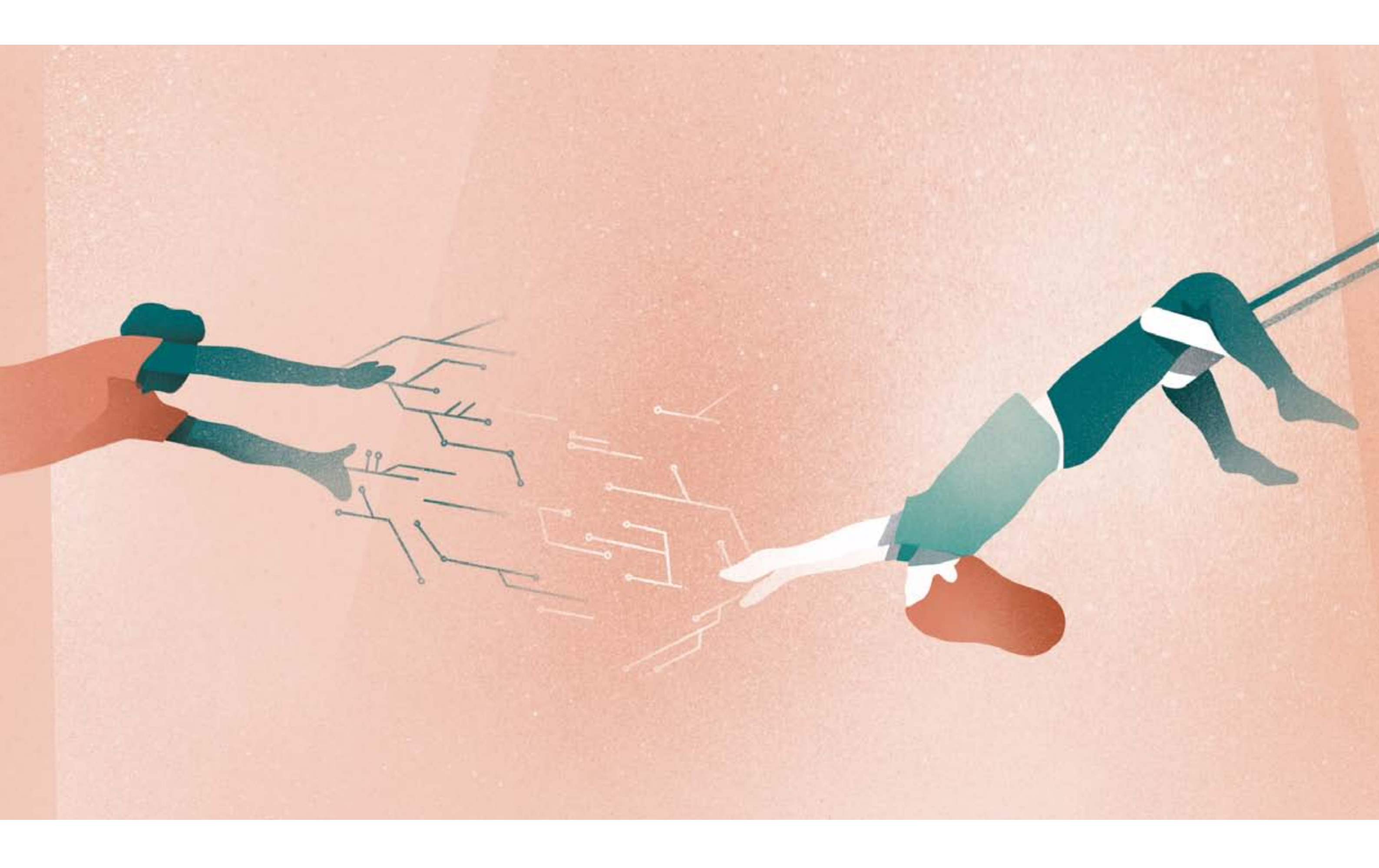
Los bancos y los Gobiernos han fracasado en muchos aspectos a la hora de generar confianza en la economía global, sobre todo en los últimos decenios. La gente común recela cada vez más del poder centralizado y busca alternativas.

El protocolo Bitcoin, y en general la técnica de la cadena de bloques (*blockchain*), permite que el papel del intermediario de confianza recaiga en las máquinas y se aparte de agentes humanos, como los banqueros. Esta técnica podría eliminar las malas prácticas del sistema en lugar de tener que castigar su práctica.

Las cadenas de bloques se prestan tanto a la emancipación humana como a un grado de vigilancia y control sin precedentes. Cómo terminen utilizándose dependerá del programa que maneje la identidad digital.

En la época actual, la gente común debe aceptar un trato asimétrico para participar en la economía global: su vida es transparente para Estados, bancos y empresas, mientras que el comportamiento y el funcionamiento interno de los actores más poderosos permanecen ocultos. La frontera entre consumidor y ciudadano se ha vuelto irreversiblemente difusa. Shoshana Zuboff, profesora de la Universidad Harvard experta en ciencias sociales, denomina «capitalismo de vigilancia» a esta interacción unilateral, extractiva, que constituye un problema estructural fundamental. Las mismas instituciones cuyos estatutos actúan como intermediarios de la confianza social (bancos y Gobiernos) han fallado estrepitosamente en muchos países del mundo, sobre todo durante la vida de aquellos menores de 35 años.

La crisis financiera de 2008 y sus secuelas moldearon un tipo de indefensión ambiental. La mayoría de los casos legales que se llevaron a los tribunales se resolvieron a expensas de los accionistas en vez de resultar en penas de cárcel para los altos cargos



de los bancos, lo cual convenció a muchos de que los ricos y poderosos se confabulaban en beneficio propio. Los problemas tienen raíces más profundas y van más allá de los efectos colaterales de las hipotecas basura. Tras analizar una base de datos de 2007 que contenía 37 millones de empresas e inversores de todo el mundo, se concluyó que el 1 por ciento de dichas empresas controlaba el 40 por ciento de la red; una buena parte de ellas eran entidades financieras. En los tres últimos decenios, los rendimientos de capital se han convertido en la principal fuente de crecimiento económico en la mayoría de los países, superando largamente el crecimiento de los ingresos y enriqueciendo aún más a los ricos que ocupan los primeros puestos del escalafón. Entretanto, 2000 millones de personas siguen sin bancarizar, excluidas de una red que, aunque dista de ser perfecta, en principio favorece el acceso al capital. No hay acuerdo sobre si deberían transformarse estas tendencias, o sobre cómo hacerlo, para fomentar una mayor igualdad e inclusión económica sin comprometer la autonomía individual.

Eso nos conduce a un momento histórico en el que aumenta la desconfianza hacia la autoridad en forma de poder y riqueza, en un contexto de vida económica que se caracteriza por una ineludible globalidad y movilidad. Si bien existe el impulso de retirarse de todo en señal de protesta, también se admite que ello constituiría una receta para el autosabotaje económico. Estas restricciones han llevado a los tecnólogos de todo el mundo a idear alternativas que acrecienten la confianza a la vez que la hagan más íntima y recíproca. No es una coincidencia que la primera moneda virtual exitosa del mundo, el bitcóin, apareciera en escena en 2009: refleja una reacción a este creciente deseo de transparencia, acceso y empoderamiento.

Por supuesto, el bitcóin es una moneda que se negocia a través de una cadena de bloques (*blockchain*), una nueva infraestructura digital que funciona como un registro distribuido de transacciones, las cuales se confirman de acuerdo a un consenso matemático, sin la intervención del ser humano. Y está provocando una revolución en lo referente a las posibilidades de



Natalie Smolenski, antropóloga cultural, escribe y diserta sobre las intersecciones entre identidad, tecnología y Gobierno. Dirige, además, el desarrollo comercial de Learning Machine, una empresa que crea aplicaciones para emitir y verificar registros oficiales en una cadena de bloques que utiliza el estándar abierto Blockcerts.

cambio directo y propiedad individual, no solo de dinero, sino también de cualquier activo digital.

A menudo se califica al bitcóin, y a las cadenas de bloques en general, de «poco fiables». Pero eso no es del todo cierto. Más bien, la confianza que antes se depositaba en actores humanos se ha trasladado a un sistema criptográfico, el cual ofrece incentivos materiales por participar en la red. En otras palabras, la confianza se está despersonalizando. A primera vista, podría parecer una paradoja. ¿Acaso todas las formas de confianza no han dependido de los seres humanos hasta cierto punto? A lo largo de la historia, el empuje del comercio y la migración global han llevado a las redes de confianza a aumentar de escala, pasando de pequeños grupos de personas conocidas a comunidades formadas en gran parte por extraños y enemigos. Para extenderse por el mundo, para alimentar poblaciones cada vez mayores, para librar guerras, para construir imperios y para contribuir al intercambio de conocimiento, la gente ha usado métodos de confianza que evolucionaron a partir de otros en una secuencia más o menos superpuesta: parentesco y donaciones, división del trabajo, contabilidad (origen del crédito y de la deuda), jerarquía, moneda, universalización de las religiones y, en tiempos más recientes, la banca.

En los albores del siglo xxi, la confianza atraviesa una nueva etapa evolutiva. Los mismos bancos que suscribieron el capitalismo moderno actuando como agentes de la confianza se han convertido, en muchos sentidos, en un impedimento para su desarrollo. En nuestro sistema financiero actual, las políticas y las leyes tienden a desincentivar las prácticas de explotación mediante el castigo. En el futuro, las cadenas de bloques podrían sencillamente borrar dichas prácticas del cuadro.

CONSTRUCCIÓN EN CADENA DE BLOQUES

El protocolo de consenso Bitcoin, que define los incentivos y los requisitos en los que se enmarca la participación en la red, mantiene con una eficacia excepcional un sistema de gobierno distribuido, abierto y de igual a igual. Sus transacciones son públicas, aunque anónimas, y una red global de desarrolladores voluntarios se ocupa del mantenimiento del código, que es abierto. La cadena de bloques Bitcoin tampoco almacena datos de identidad; en vez de cuentas, utiliza pares de claves, una pública y otra privada, como direcciones.

Sin embargo, las transacciones basadas en cadenas de bloques pueden rastrearse con más facilidad que el dinero en efectivo, lo que implica que, en cuanto un determinado par de claves se vincula a una identidad conocida, un análisis de la red podría, por ejemplo, ayudar a la policía a averiguar el paradero de delincuentes. Esta realidad se opone a la suposición de que las criptodivisas son más apropiadas para actividades delictivas que otros tipos de moneda. De hecho, hace reaparecer el espectro del capitalismo de vigilancia. Curiosamente, las cadenas de bloques tienen propiedades que se prestan tanto a la emancipación humana como a un grado de vigilancia y control sin precedentes. Que terminen utilizándose para lo primero o para lo segundo dependerá del modo en que la arquitectura de la «pila de *software*» (el protocolo de la cadena de bloques y la capa de aplicación) maneje la identidad digital.

En lo que atañe al protocolo, es importante entender que existe más de una forma de diseñar una cadena de bloques. En términos generales, se habla de «cadena de bloques» para describir una clase de sistema en el que se replica un único registro universal de transacciones, aunque no se ha alcanzado un acuerdo total sobre el conjunto de características necesarias. Se han sugerido innumerables cadenas, que se construyen para resolver distintos problemas.

Considérese Ethereum, una plataforma pública que pretende convertirse en un ordenador distribuido global, bautizado como Máquina Virtual Ethereum. Su cadena almacena contratos inteligentes que se ejecutan cuando se cumplen las condiciones especificadas en ellos. A diferencia de Bitcoin, los usuarios más comprometidos con la red (que se determinan por medio de depósitos de garantía) tienen la oportunidad de validar colectivamente nuevos bloques. A los usuarios que no muestran una buena conducta se les confiscan sus fondos de forma automática.

Algunas cadenas de bloques se diseñan para comunidades de usuarios entre los que existe un mayor nivel de confianza. Estas cadenas «con permiso» dependen por lo general de una autoridad central que concede acceso al sistema a determinados usuarios para que operen como validadores de transacciones. Para cerciorarse de que todos observan un buen comportamiento, las cadenas autorizadas tienden a recurrir a métodos disciplinarios en vez de a incentivos materiales automáticos. Un buen ejemplo lo constituye Ripple, una plataforma diseñada específicamente para servir de red de liquidación de transacciones entre bancos. Asimismo, la Enterprise Ethereum Alliance está integrada por casi 200 miembros corporativos que están creando un conjunto de herramientas de código abierto para que las empresas puedan diseñar sus propias versiones autorizadas de la cadena de bloques Ethereum.

A otras iniciativas similares se las denomina libros de contabilidad (o registros) distribuidos, porque pueden carecer de una o todas las características subyacentes de las cadenas de bloques. Por lo general cuentan con permiso y muchas de sus transacciones también se mantienen en privado. Un importante registro distribuido es R3 Corda, que fue desarrollado por un consorcio de bancos para facilitar los consensos relacionados con acuerdos financieros.

Las cadenas de bloques autorizadas y los libros de contabilidad distribuidos surgieron en parte con el fin de incluir algún tipo de comprobación de identidad de los validadores y operadores de la red. (Por diseño, en el protocolo Bitcoin no existe de forma nativa tal verificación.) El campo de identidad conforma el terreno sobre el cual se desarrollarán socialmente las características emancipadoras u opresivas de las cadenas de bloques. Cuanto más fácil resulte asociar las transacciones de alguien a una identidad, y cuanto más centralizada y controlada por agentes

externos esté la identidad digital de un individuo, más se multiplicarán las posibilidades de que se produzcan abusos.

PERSPECTIVAS Y RIESGOS

Del mismo modo que ocurre con Internet, una persona corriente no puede utilizar directamente ninguna cadena de bloques. En su lugar, el individuo dispone de aplicaciones que hacen uso, de una forma u otra, de la cadena subyacente. Es en esta capa de aplicación donde puede reinar una confusión indecible y, con frecuencia, una absoluta mala fe. La historia del bitcóin, por ejemplo, está sembrada de proveedores de carteras y bolsas de criptodivisas que cometieron enormes fallos de seguridad en sus aplicaciones, los cuales propiciaron pirateos notorios y acusaciones de desfalco. En el caso de la red Ethereum, las vulnerabilidades han acarreado el robo o la pérdida de millones de dólares en su criptomoneda *ethereum*, sin prácticamente ninguna protección para los usuarios. En general, usar cualquier aplicación creada por un tercero para guardar activos digitales basados en cadenas de bloques aún es una propuesta altamente insegura.

Se trata de un círculo vicioso: la gente no utilizará cadenas de bloques sin aplicaciones amigables. Pero estas a menudo logran su facilidad de uso a través de la centralización, la cual reproduce las condiciones de control que las cadenas de bloques intentaban burlar.

No obstante, si las cadenas de bloques se extienden, será necesaria cierta correlación entre identidad y transacciones. Quizá no se nos exija que revelemos por completo quiénes somos. Como algunos miembros de la comunidad Bitcoin han argumentado, la fijación actual con la verificación de identidad está en gran medida equivocada; en general, la gente tan solo quiere saber si una determinada afirmación sobre uno es cierta: ¿es mayor de edad?, ¿de verdad obtuvo un doctorado en el MIT?, ¿es ciudadano estadounidense? Las estructuras de incentivos del capitalismo de vigilancia nos han acostumbrado a creer que es necesario ceder todos los datos personales para poder desenvolvernos en el mundo. Las técnicas de cadena de bloques pueden ejercer una influencia extraordinaria para cambiar esa percepción.

Imaginemos, por ejemplo, un futuro en el que se realicen votaciones electrónicas. Una junta electoral debe ser capaz de asociar la emisión de un voto con un votante censado, de modo que pueda «tacharse». Pero el proceso no tiene por qué revelar a la junta la identidad del individuo. Bastaría con que comprobara que el elector está incluido en el censo y registrara que ha emitido su voto, todo ello sin identificar el voto con el votante.

Los proyectos que minimizan la dispersión de la denominada «información personal identificable» aún escasean, en parte porque no resulta fácil monetizarlos, ya sea en forma de moneda financiera o en forma de esa «moneda» que son los datos personales. Un ejemplo lo constituye Blockcerts, una serie de bibliotecas de referencia desarrolladas por el Laboratorio de Medios del MIT y Learning Machine, la empresa donde trabajo. Blockcerts permite que los individuos guarden sus activos digitales en

Las estructuras de incentivos del capitalismo de vigilancia nos han acostumbrado a pensar que es necesario ceder todos los datos personales para poder desenvolvernos en el mundo. Las técnicas de cadena de bloques pueden cambiar esta creencia

un monedero privado que se encuentra alojado en sus propios dispositivos. Los documentos emitidos a una persona no se asocian con ningún perfil de identidad a menos que el destinatario así lo decida. Todo el código es abierto, de modo que cualquiera puede inspeccionar su integridad y utilizarlo para crear aplicaciones para enviar, almacenar, compartir y verificar documentos oficiales. Este enfoque, que se basa en notificaciones, representa un paso hacia lo que algunos han llamado «identidad autosoberana», que significa que los individuos tienen el control administrativo sobre sus propios datos.

La cadena de bloques es de hecho una técnica revolucionaria. Pero si las aplicaciones basadas en ella no se diseñan con un claro compromiso hacia la autosoberanía digital, no habrá nada, en principio, que impida que los seres humanos sean tratados como objetos de una cadena de suministro, ni que cada movimiento y actividad queden registrados, quizá de forma permanente. La creación de identidades digitales cuya existencia sea independiente de los Gobiernos y las corporaciones es el próximo gran desafío que las cadenas de bloques plantean y, al mismo tiempo, podrían ayudar a resolver. IyC

PARA SABER MÁS

Debt: The first 5000 years. Edición actualizada. David Graeber. Melville House, 2014.
The age of cryptocurrency: How bitcoin and digital money are challenging the global economic order. Michael Casey y Paul Vigna. St. Martin's Press, 2015.
Big other: Surveillance capitalism and the prospects of an information civilization. Shoshana Zuboff en *Journal of Information Technology*, vol. 30, n.º 1, págs. 75-89, marzo de 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

Un cálculo del riesgo. Gary Stix en *IyC*, julio de 1998.
Identidad en la Red. I. Alamillo Domingo en *IyC*, noviembre de 2008.
Nuevas concepciones de la privacidad. Jaron Lanier en *IyC*, enero de 2014.

Alberto Domínguez es investigador del Grupo de Altas Energías de la Universidad Complutense de Madrid y coordinador del Grupo de Blázares y Núcleos Galácticos Activos de la colaboración Fermi-LAT. Su trabajo se centra en la astrofísica de altas energías y en la evolución de las galaxias.



ASTROFÍSICA

UNA NUEVA IMAGEN DEL UNIVERSO VIOLENTO

El telescopio espacial Fermi ha completado el primer mapa celeste de fuentes de muy alta energía. El logro guiará la astronomía de rayos gamma durante los próximos años

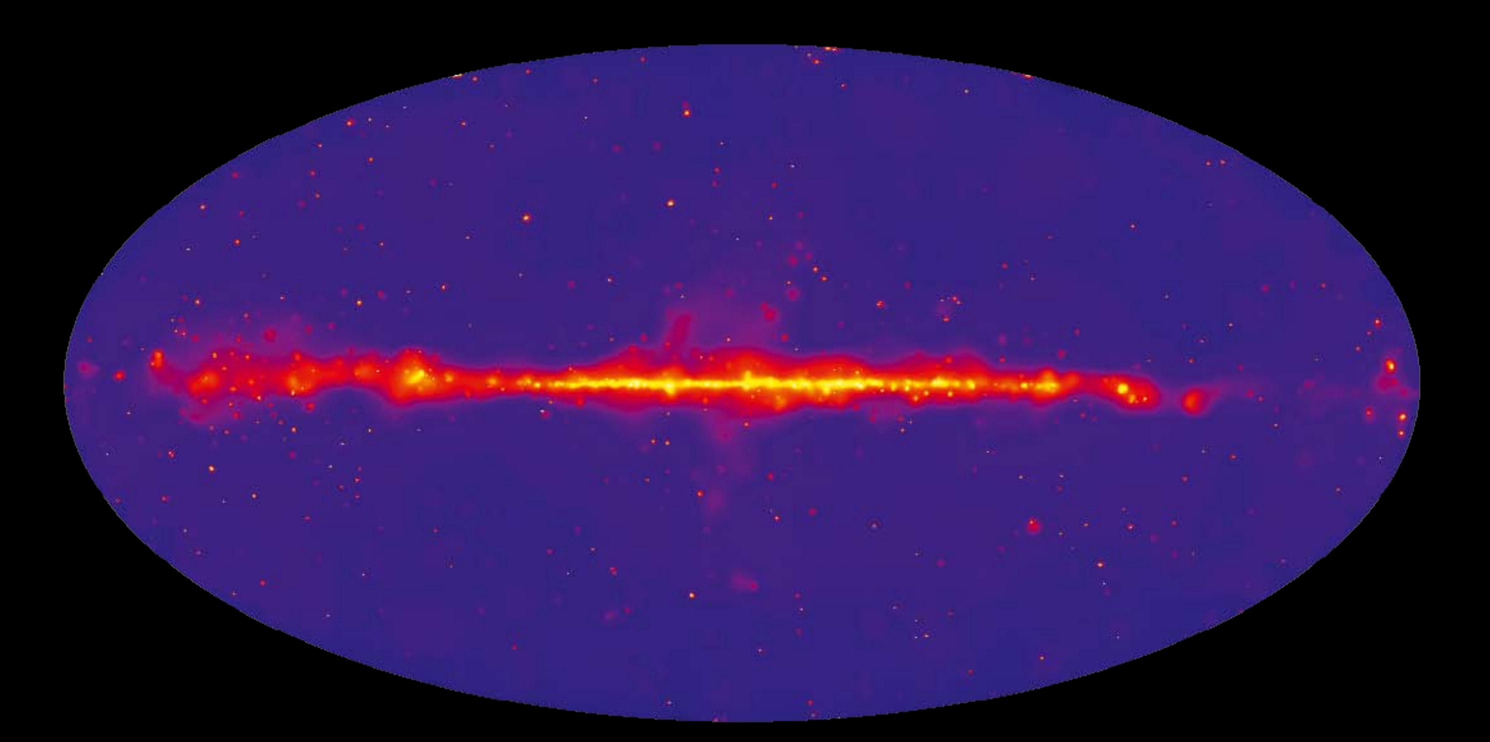
Alberto Domínguez

El cielo nocturno con el que estamos más familiarizados, el que podemos apreciar a simple vista, está compuesto principalmente por la Luna, algunos planetas como Venus y Júpiter, y numerosas estrellas que abarcan un amplio abanico de brillos y colores. En general, todos estos astros se hallan en nuestro entorno cósmico más cercano, lugares relativamente tranquilos de la Vía Láctea.

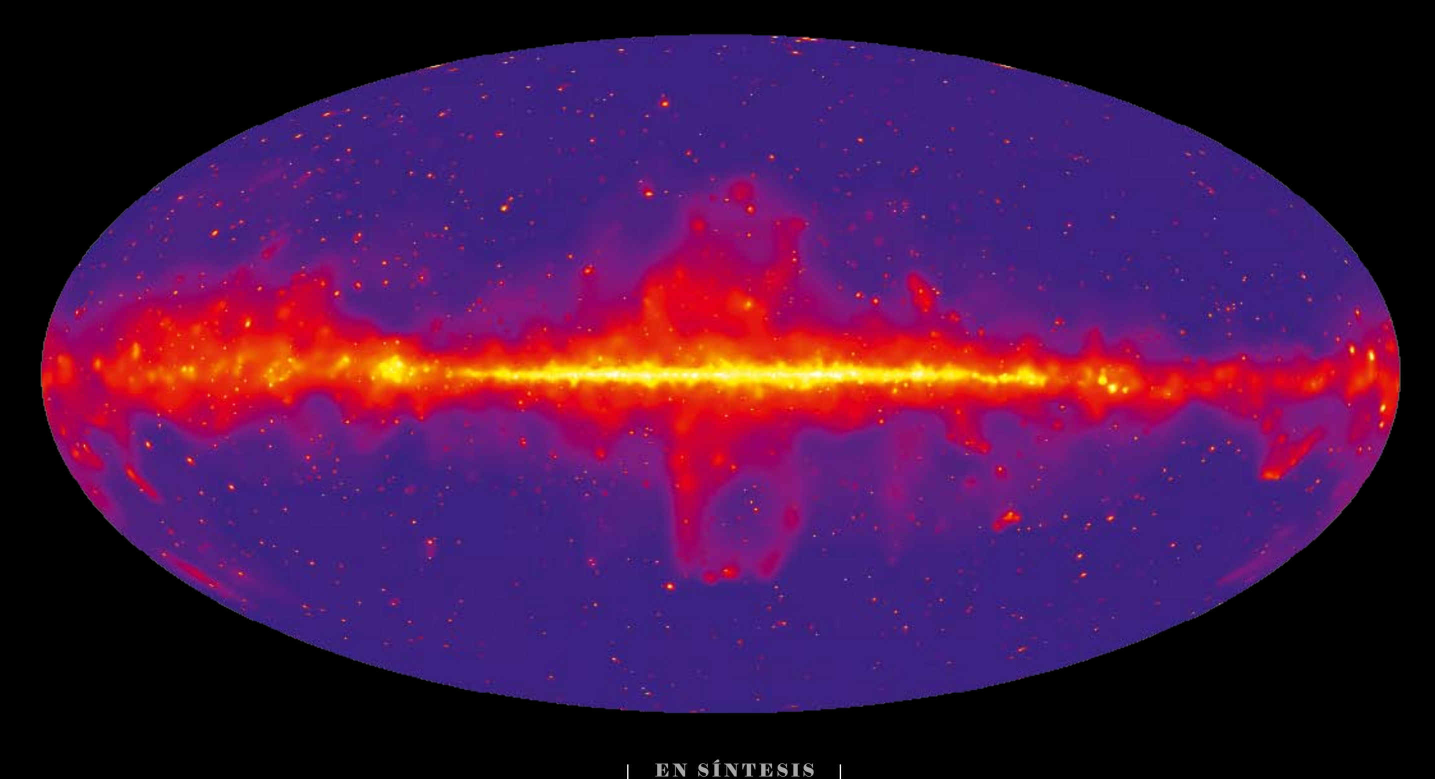
Sin embargo, el universo es rico en objetos astronómicos mucho más exóticos, situados en los ambientes más extremos y agitados no solo de nuestra galaxia, sino del cosmos en su totalidad. Algunos ejemplos nos los proporcionan las supernovas, las estrellas de neutrones o los agujeros negros supermasivos que habitan en galaxias distantes. Los fenómenos físicos que tienen lugar en estos entornos (fenómenos que podemos denominar «violentos») generan ingentes cantidades de un tipo de luz que nuestros ojos no pueden ver: rayos gamma, la forma de radiación electromagnética más energética que existe.

Por fortuna, desde hace varias décadas disponemos de los medios técnicos necesarios para abrir esta nueva ventana al universo; dispositivos que funcionan como «gafas» para observar un cielo al que no estamos habituados y que de otro modo nunca podríamos ver. Uno de esos instrumentos es el telescopio espacial Fermi. Lanzado por la NASA hace ahora diez años, este observatorio fue diseñado para estudiar las fuentes astrofísicas de rayos gamma y los procesos físicos que dan lugar a estas emisiones de alta energía. Fermi es, hasta hoy, el instrumento espacial más potente y el que más resultados

COLABORACIÓN FERMI-LAT; DE «2FHL: THE SECOND CATALOG OF HARD FERMI-LAT SOURCES», M. ACKERMANN ET AL. EN *THE ASTROPHYSICAL JOURNAL SUPPLEMENT SERIES*, VOL. 222, ENERO DE 2016 (*2FHL*) Y «3FHL: THE THIRD CATALOG OF HARD FERMI-LAT SOURCES», M. AJELLO ET AL. EN *THE ASTROPHYSICAL JOURNAL SUPPLEMENT SERIES*, VOL. 232, SEPTIEMBRE DE 2017 (*3FHL*)



EL FIRMAMENTO A ALTAS ENERGÍAS: Gracias a mejoras en el procesamiento de datos, el telescopio Fermi, de la NASA, ha obtenido la primera imagen completa del cielo a energías que antes eran inaccesibles. Estos mapas muestran el firmamento en coordenadas galácticas (en las que la Vía Láctea aparece en el ecuador) según los recientes catálogos 2FHL (fotones con energías mayores de 50 gigaelectronvoltios, *arriba*) y 3FHL (energías superiores a 10 gigaelectronvoltios, *abajo*). Los «puntos calientes» ajenos al disco de la Vía Láctea corresponden en su mayoría a agujeros negros supermasivos en galaxias lejanas. Como puede comprobarse, el brillo del cielo aumenta al considerar energías más bajas.



EN SÍNTESIS

El telescopio espacial Fermi, de la NASA, fue lanzado hace ahora diez años para observar el cielo en rayos gamma. Esta radiación es emitida por los procesos astrofísicos más extremos del universo.

En estos años Fermi ha detectado miles de fuentes de alta energía. Entre ellas destacan los púlsares, los remanentes de supernova y los agujeros negros supermasivos situados en galaxias distantes.

Esa imagen del universo violento acaba de ampliarse. Varias mejoras en el sistema de análisis de datos han permitido extender la sensibilidad del instrumento a energías que antes eran inaccesibles.

Los nuevos mapas de Fermi están permitiendo entender mejor algunos de los procesos astrofísicos más extremos del universo. Además, servirán como guía para la próxima generación de telescopios terrestres de rayos gamma.

ha obtenido en este ámbito de la astronomía. Gracias a él, ese cielo violento que no podemos apreciar a simple vista nos es cada vez más familiar.

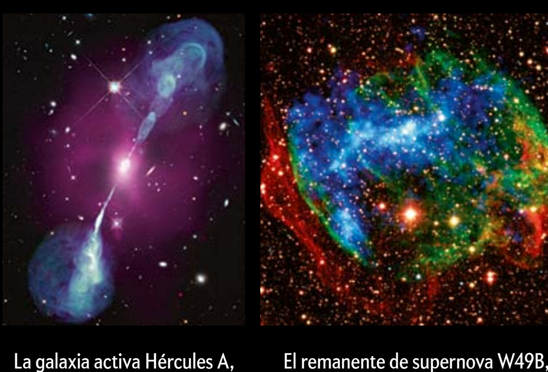
En estos años, y entre otros muchos hallazgos, Fermi ha detectado más de 3000 fuentes que emiten rayos gamma con energías del orden del gigaelectronvoltio (GeV), el 90 por ciento de las cuales eran desconocidas con anterioridad (un gigaelectronvoltio equivale a un millón de veces la energía de los rayos X empleados en medicina, o mil millones de veces la energía de un fotón visible). Estos resultados han permitido descubrir nuevos objetos y estudiar otros ya conocidos desde una nueva perspectiva.

FENÓMENOS EXÓTICOS

¿A qué denominamos proceso violento?

Todo sistema físico, solo por el hecho de tener temperatura, emite luz siguiendo un patrón conocido como radiación de cuerpo negro, o térmica. Así emiten fotones las bombillas tradicionales, pero también casi todas las estrellas y el polvo interestelar cuando se calienta. Tales procesos son estables, en el sentido de que persisten durante escalas de tiempo de millones de años, y suelen generar fotones con energías del orden del electronvoltio. Es a estos fenómenos a los que el ojo humano y los telescopios ópticos e infrarrojos son sensibles.

Sin embargo, existen procesos astrofísicos en los que un objeto emite radiación siguiendo un patrón distinto, que no guarda relación con su temperatura, sino con el comportamiento de la materia en condiciones extremas. Tales fenómenos originan radiación mucho más energética (rayos X y gamma) y, en general, se caracterizan por variar rápidamente en el tiempo, hasta el punto de que sus cambios pueden llegar a percibirse en una misma noche de observación. Estos procesos no térmicos, relativamente variables y que emiten radiación muy energética reciben el nombre de «violentos». Algunos ejemplos son las explosiones de supernova, las emisiones de púlsares o la dinámica de acreción de materia en las inmediaciones de un agujero negro.



La galaxia activa Hércules A, en cuyo centro se encuentra un agujero negro supermasivo de unos 4000 millones de masas solares.

El remanente de supernova W49B, situado a 35.000 años luz en la constelación del Águila.

Hace poco, ese impresionante catálogo de fuentes violentas se ha ampliado. Una serie de mejoras en el sistema de análisis y procesamiento de datos (mejoras equivalentes a haber renovado la instrumentación del telescopio, pero sin los costes que implican las actualizaciones en el espacio) nos han permitido ampliar su capacidad de detección hasta las decenas de GeV. En 2016 se publicó el primer mapa del cielo a energías superiores a los 50 GeV, el cual incluía 360 fuentes cósmicas de alta energía. Y, el año pasado, Fermi completó el primer cartografiado a energías de más de 10 GeV, con 1556 fuentes. Como veremos, esta nueva imagen del firmamento no solo nos está ayudando a entender mejor algunos de los fenómenos más extremos del universo, sino que será de vital importancia para la astronomía de las próximas décadas.

ASTRONOMÍA DE RAYOS GAMMA

La astronomía de rayos gamma exige el empleo de telescopios muy diferentes de los usados en la astronomía tradicional (visible e infrarroja). Ello se debe a que no es posible detectar radiación de alta energía con espejos, ya que los fotones gamma los atraviesan con facilidad. Por otro lado, no solo hemos de emplear instrumentos muy distintos, sino que, en la mayoría de los casos, estos deben llevar a cabo sus observaciones desde el espacio. La razón es simple: la atmósfera terrestre actúa como un filtro que bloquea los rayos gamma.

Fermi posee dos instrumentos: el Monitor de Estallidos de Rayos Gamma (GBM, por sus siglas en inglés) y el Telescopio de Gran Área (LAT), su detector principal. Este último fue diseñado inicialmente para observar fotones con energías comprendidas entre los 0,1 y los 100 GeV, un intervalo que recorre tres órdenes de magnitud. La técnica de detección consiste en convertir los fotones gamma incidentes en pares electrón-positrón. Después, al medir las propiedades de estas partículas, como su energía y la trayectoria que siguen en el interior del aparato, el sistema es capaz de reconstruir la energía y la dirección de procedencia del fotón gamma original. Fermi-LAT opera en un modo de observación que le permite ver el cielo completo cada tres horas, con una sensibilidad y resolución angular excelentes. Esto quiere decir que puede detectar fuentes débiles y localizarlas con gran precisión en el cielo.

Sin embargo, existen procesos astrofísicos que radian a energías aún mayores que las que puede observar Fermi-LAT. Esta luz resulta accesible para una clase de telescopios que se pusieron en marcha a finales de los años noventa, pero que solo han comenzado a desarrollarse de forma robusta en este siglo: los telescopios Cherenkov de imagen atmosférica. Se trata de instrumentos situados en tierra y que emplean la atmósfera como medio detector. Los rayos gamma que llegan desde el espacio interaccionan con las capas altas de la atmósfera y generan una cascada de partículas secundarias que avanzan a una velocidad mayor que la de la luz en el aire. Cuando esto ocurre, se producen destellos muy rápidos de luz visible, principalmente azulada, conocida como luz de Cherenkov (un fenómeno similar a la onda de choque sonora que tiene lugar cuando un avión rebasa la barrera del sonido). Los telescopios Cherenkov detectan esa luz, generada en la atmósfera, gracias a espejos gigantes y a una electrónica muy rápida.

En general, los sistemas Cherenkov cuentan con más de un telescopio para poder observar la misma señal desde posiciones diferentes. Esta técnica, llamada estereoscopía, permite una caracterización más precisa de cada fotón. Uno de los experimentos líderes en este campo es el sistema de telescopios MAGIC, en el

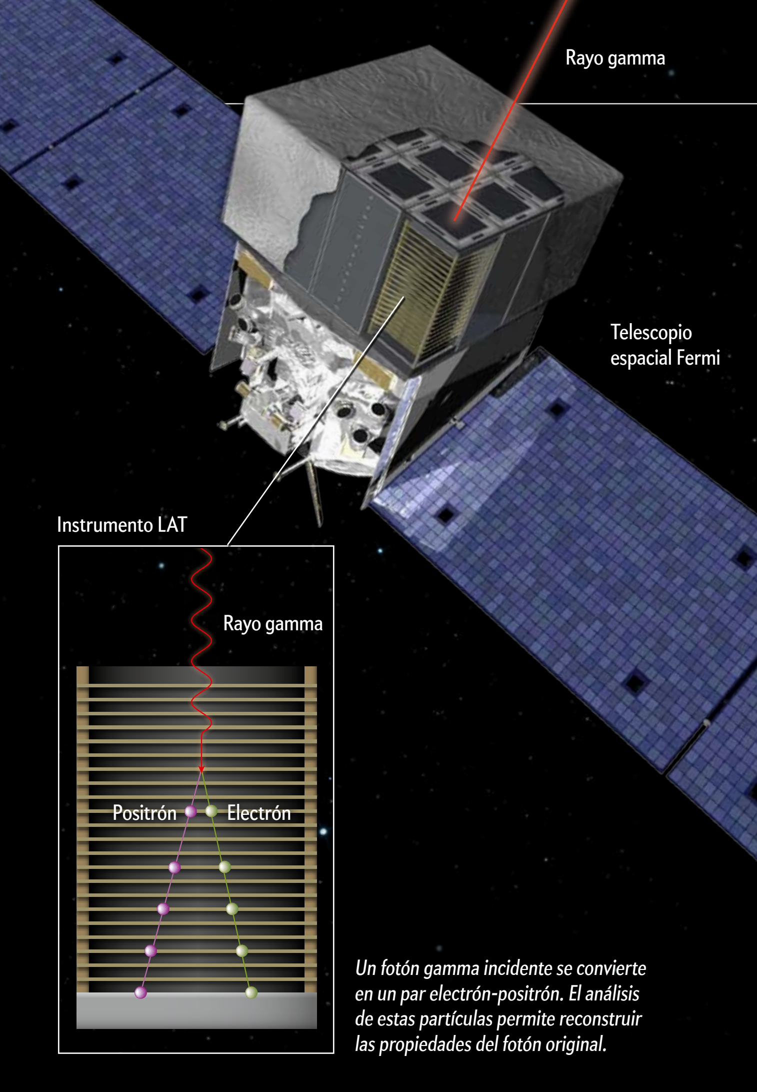
CALTECH/SSC/J. RHO/T. JARRETT Y NASA/CXC/SSC/J. KEOHANE ET AL. (*W49b*); NASA/CXC/SAO/A.PAGGI ET AL (*Hércules A, rayos X*); NASA/STSCI (*Hércules A, óptico*); NSF/NRAO/VLA (*Hércules A, radio*)

Un nuevo telescopio Fermi

El telescopio espacial Fermi, de la NASA, fue lanzado en 2008 para observar el cielo en rayos gamma. Su principal instrumento es el Telescopio de Gran Área (LAT, por sus siglas en inglés), el cual convierte un fotón gamma incidente en un par electrón-positrón (*derecha*). Al analizar las propiedades de estas partículas, resulta posible reconstruir las del fotón original, como su energía y dirección de origen.

Sin embargo, al encontrarse en el espacio, el instrumento se ve sometido al bombardeo constante de los rayos cósmicos, por lo que hace falta un método que permita diferenciar entre estos últimos y las partículas verdaderamente producidas por un rayo gamma. La tarea no es sencilla: por cada rayo gamma que interacciona con el detector, inciden unos 10.000 rayos cósmicos.

En 2015, la colaboración Fermi-LAT desarrolló una técnica de procesado de datos cuya última versión, conocida como Pass 8, incluía importantes mejoras con respecto a las anteriores. Al perfeccionar la reconstrucción de los parámetros del rayo gamma y eliminar el ruido producido por los rayos cósmicos, Pass 8 provee unas mejoras que resultan equivalentes a haber renovado la instrumentación del telescopio, pero sin los costes que conllevan las actualizaciones en el espacio. Ello ha permitido detectar fotones a energías que antes eran inaccesibles, mejorar la sensibilidad del instrumento en un 40 por ciento y multiplicar por dos la precisión para localizar objetos en la bóveda celeste (*abajo*).



Un fotón gamma incidente se convierte en un par electrón-positrón. El análisis de estas partículas permite reconstruir las propiedades del fotón original.

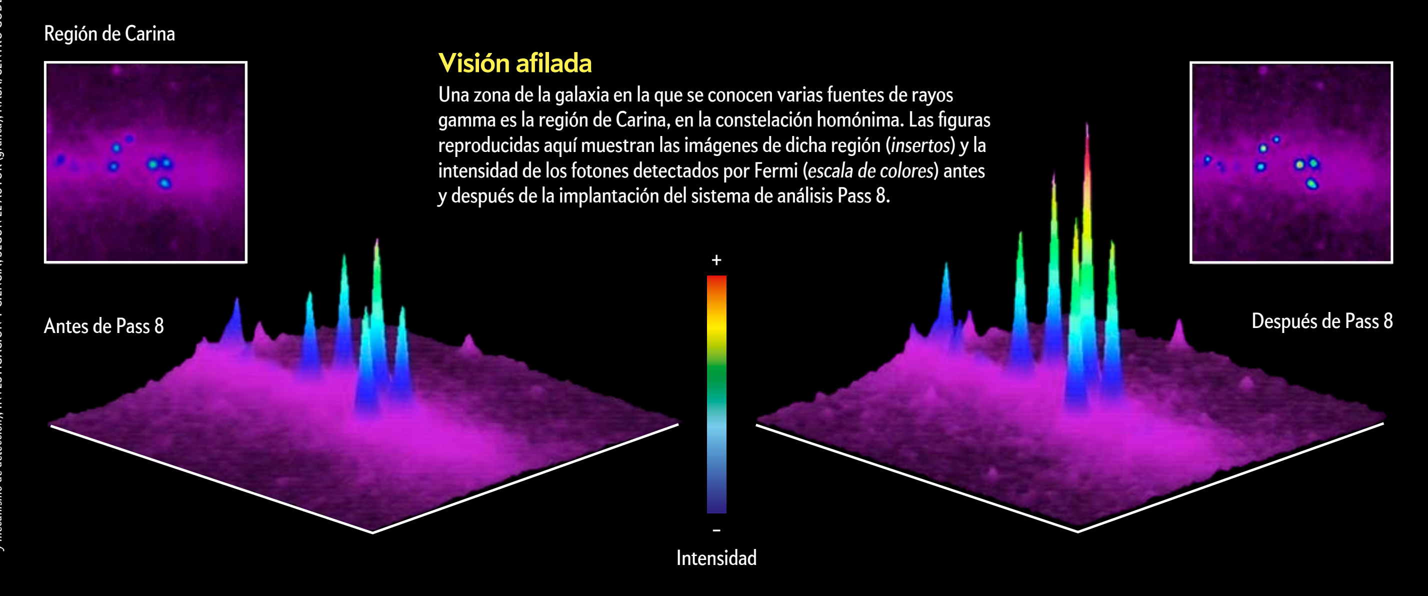


Nuevas energías

Las nuevas técnicas de análisis de los datos del telescopio Fermi han permitido observar el cielo a energías que antes eran indetectables (*rojo*). Ello ha propiciado el descubrimiento de nuevas fuentes astrofísicas de alta energía y ha mejorado la caracterización de otras ya conocidas (*abajo*). Además, haber cubierto ese intervalo energético permitirá conectar sus observaciones con las de los telescopios terrestres, los cuales solo son sensibles a energías muy elevadas.

Visión afilada

Una zona de la galaxia en la que se conocen varias fuentes de rayos gamma es la región de Carina, en la constelación homónima. Las figuras reproducidas aquí muestran las imágenes de dicha región (*insertos*) y la intensidad de los fotones detectados por Fermi (*escala de colores*) antes y después de la implantación del sistema de análisis Pass 8.



NASA/LABORAATORIO DE IMÁGENES CONCEPTUALES/CENTRO GODDARD DE VUELOS ESPACIALES, ADAPTADO POR INVESTIGACIÓN Y CIENCIA (*telescopio Fermi, instrumento LAT y mecanismo de detección*); INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, SEGÚN EL AUTOR (*gráfica*); NASA/CENTRO GODDARD DE VUELOS ESPACIALES (*región de Carina*)

Faros cósmicos

La gran mayoría de las fuentes que aparecen en los nuevos catálogos de Fermi son agujeros negros supermasivos situados a miles de millones de años luz de distancia. Estos objetos suelen estar rodeados por un gran disco de material que, al caer hacia ellos, emite chorros de partículas y radiación de alta energía (*izquierda*). Cuando estos haces apuntan directamente hacia la Tierra, la fuente recibe el nombre de «blázar». Los nuevos mapas celestes obtenidos por Fermi están permitiendo estudiar mejor estos objetos y analizar sus mecanismos de emisión en términos de los procesos subyacentes de física de partículas (*derecha*).

Recreación artística de un blázar.

Observatorio del Roque de los Muchachos en la isla de La Palma, formado por dos instrumentos de 17 metros de diámetro. Allí mismo comenzará en breve la construcción del observatorio norte de la Red de Telescopios Cherenkov (CTA), un proyecto mundial que liderará la astronomía de muy alta energía durante décadas y que cuenta con una importantísima contribución española [*véase* «La Red de Telescopios Cherenkov», por Juan Cortina y Manel Martínez; Investigación y Ciencia, mayo de 2016].

Los telescopios Cherenkov se caracterizan por tener una sensibilidad muy elevada; es decir, logran captar flujos muy tenues de fotones. Sin embargo, poseen un campo de visión reducido: solo son capaces de observar una pequeña porción del cielo de una vez, por lo que normalmente necesitan apuntar durante horas para detectar fuentes de rayos gamma. Por tanto, estos instrumentos se orientan a zonas del cielo en las que la probabilidad de encontrar una fuente de muy alta energía es lo suficientemente elevada para no desaprovechar un preciado tiempo de telescopio. Esta estrategia, sin embargo, resulta muy ineficiente para muestrear regiones amplias del firmamento.

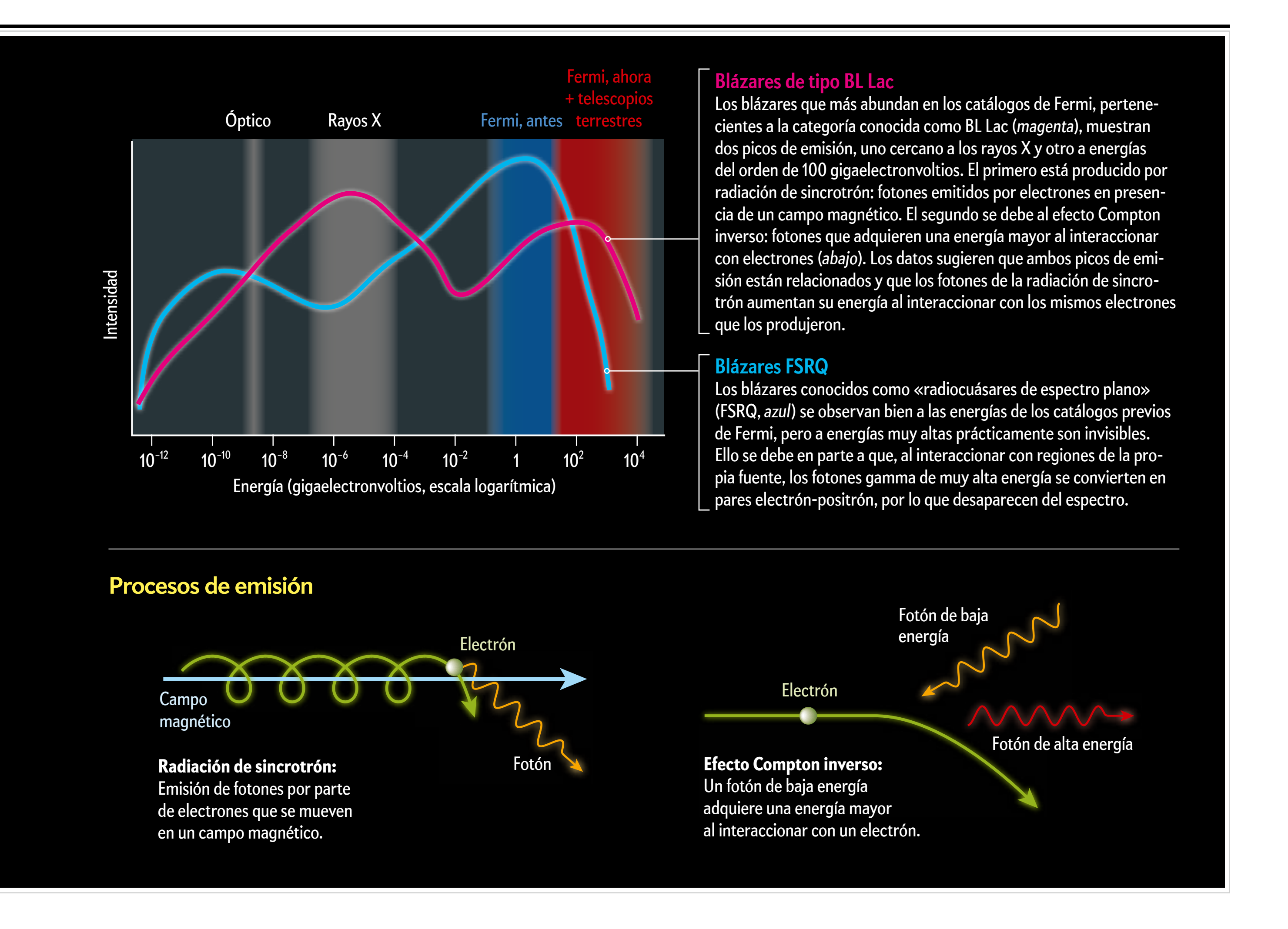
Hasta la publicación de los últimos catálogos de Fermi, existía un hueco entre las energías a las que Fermi-LAT mostraba su mayor sensibilidad y aquellas detectables por los telescopios Cherenkov. Esto suponía un problema por dos razones. Primero, porque resultaba difícil conectar las observaciones de ambos sistemas de detección. Y segundo, porque en ese hueco energético existen fenómenos físicos interesantes que, como consecuencia, escapaban a nuestro estudio. Los recientes avances en el sistema de análisis de datos del telescopio Fermi han conseguido exprimir al máximo las capacidades del instrumento LAT y han logrado cubrir ese vacío. Ello ha permitido muestrear todo el cielo a energías que abrirán el camino para los futuros estudios con telescopios Cherenkov.

CATÁLOGOS CELESTES

En estos años, la colaboración Fermi-LAT, la encargada de la explotación científica del instrumento, ha publicado varios catálogos en los que se detallan las propiedades de las fuentes de alta energía detectadas. Cada nuevo muestreo se sirve de mejoras en la cadena de análisis e incluye un mayor número de fotones analizados gracias a un período de observación más extenso. El último censo a energías del orden de 1 GeV (aquellas para las que Fermi-LAT presenta una mayor sensibilidad de diseño) se conoce como 3FGL, o tercer catálogo de rayos gamma de Fermi-LAT. Fue publicado en 2015 e incluye unas 3000 fuentes detectadas en cuatro años de misión científica. La próxima versión, el 4FGL, deberá concluirse a lo largo de este año.

Los catálogos publicados en 2016 y 2017, en cambio, incluyen fuentes que en jerga técnica denominamos «duras», ya que emiten fotones de muy alta energía con bastante intensidad. El muestreo de 2016, conocido como 2FHL (segundo catálogo

NASA/LABORATORIO DE IMÁGENES CONCEPTUALES/CENTRO GODDARD DE VUELOS ESPACIALES (*blázar*); INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, SEGÚN EL AUTOR (*gráfica y procesos de emisión*)



de fuentes duras de Fermi-LAT), nos brindó la primera imagen completa del cielo a energías superiores a 50 GeV. Como su nombre indica, existe también una primera versión, que, aunque supuso un gran éxito científico, no cerró el hueco energético existente entre los cartografiados anteriores y el cielo accesible a los telescopios Cherenkov.

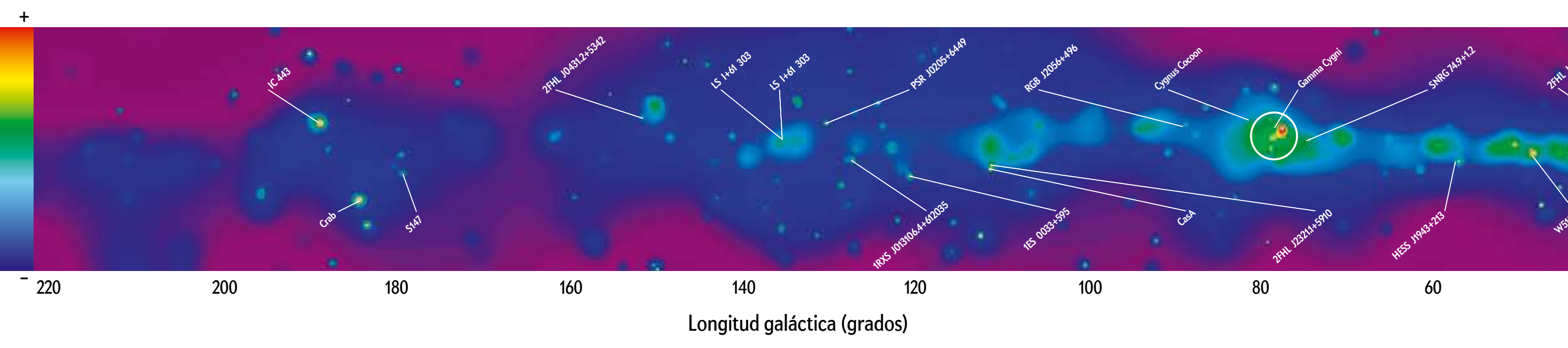
El 2FHL fue concebido para mejorar las búsquedas de fuentes energéticas con telescopios Cherenkov y para estudiar procesos físicos que tienen lugar a energías que antes resultaban difícilmente accesibles. Tales logros han sido posibles gracias a dos razones. Primero, el desarrollo de Pass 8, una nueva herramienta de procesamiento de los datos de Fermi-LAT, basada en una mejor comprensión de dichos datos y del funcionamiento del telescopio. Segundo, la mayor cantidad de datos disponibles, debida a que el instrumento ha estado observando el cielo durante más tiempo.

Los resultados han sido asombrosos. Se han catalogado 360 fuentes de fotones gamma de muy alta energía, 57 de las cuales eran totalmente desconocidas con anterioridad (el resto, aunque no se hubiesen observado a tales energías, podían asociarse a fuentes detectadas en otras longitudes de onda). Cada una de las fuentes astrofísicas del 2FHL funciona como un gigantesco acelerador cósmico de partículas; más potente, de hecho, que el Gran Colisionador de Hadrones del CERN, en Ginebra, el mayor construido hasta ahora por la humanidad.

El año pasado se publicó el catálogo 3FHL, elaborado también gracias al sistema de procesamiento de datos Pass 8 y concebido para cartografiar el cielo a energías superiores a los 10 GeV. Dicho muestreo incluye 1556 fuentes, 214 de ellas nuevas. Uno de los objetivos principales de este catálogo será servir como guía a la futura generación de telescopios Cherenkov liderada por CTA. El proyecto CTA será sensible a energías más bajas que las que detectan los telescopios Cherenkov actualmente en funcionamiento, lo que hace necesario un mapa del cielo a energías menores que las registradas por el 2FHL. En conjunto, estos dos catálogos nos ofrecen la imagen del cielo a altas energías más completa que tendremos hasta, al menos, 2024, año en que se habrá doblado la cantidad de datos actual.

FUENTES EXTRAGALÁCTICAS

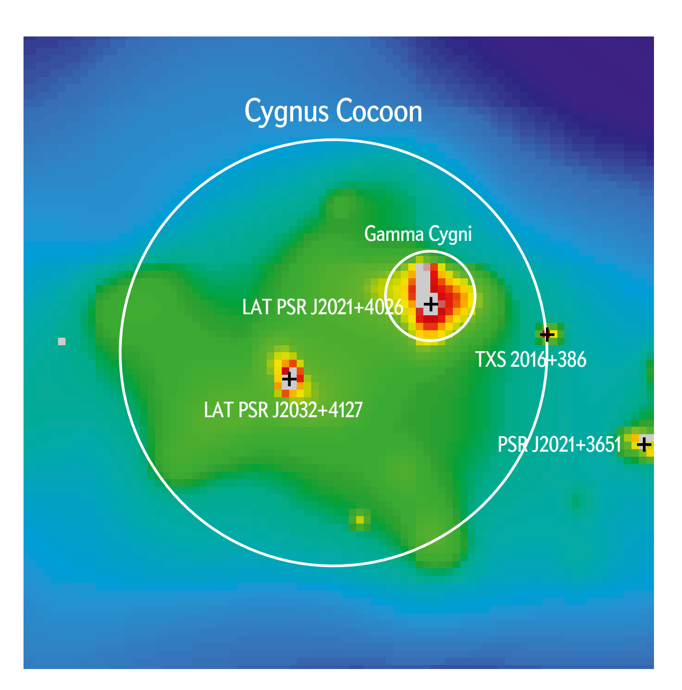
¿Qué física nos revelan estos nuevos mapas celestes? En torno al 80 por ciento de las fuentes catalogadas corresponden a agujeros negros supermasivos situados en galaxias distantes, algunas de ellas tan lejanas que hoy las vemos tal y como eran hace más de 10.000 millones de años (la edad actual del universo se estima en unos 13.800 millones de años). En general, un agujero negro supermasivo se encuentra rodeado por un gran disco de materia que, al caer hacia él, emite potentes chorros de partículas y radiación. Cuando esos haces apuntan directamente hacia la Tierra, el astro recibe el nombre de «blázar» (del inglés *blaze*,



FUENTES GALÁCTICAS: Mapa del disco de la Vía Láctea según el catálogo 2FHL, uno de los nuevos muestreos de Fermi, donde se cartografía la intensidad de fotones gamma de más de 50 gigaelectronvoltios. Las mejoras efectuadas en el sistema de análisis de datos han permitido identificar varias decenas de fuentes de alta energía en nuestra galaxia. La escala de colores (*de azul a rojo*) refleja el número de fotones (*de menos a más*) detectado en cada zona del cielo. Nótese cómo el número de fuentes aumenta hacia el centro de la Vía Láctea (a 0 grados).

«resplandecer»). Los datos que ofrecen los catálogos 2FHL y 3FHL revisten utilidad para analizar los mecanismos de emisión de estos objetos astrofísicos en términos de la física de partículas subyacente.

Los blázares radian en todo el espectro electromagnético, aunque a cada energía contribuyen distintos mecanismos de emisión. En el tipo de blázares más observados a altas energías, pertenecientes a la clase conocida como BL Lac (el nombre del prototipo de estos objetos, BL Lacertae), se observan dos picos de intensidad: uno cercano a los rayos X y otro a energías del orden de los 100 GeV. Los datos indican que el primer pico es producido por radiación de sincrotrón: fotones emitidos por electrones que cambian su dirección de movimiento en presencia de un campo magnético. Por su parte, el pico a energías más elevadas se debe al efecto Compton inverso: fotones que adquieren más energía al interaccionar con electrones. En particular, pensamos que en este tipo de blázares ambos picos de emisión están relacionados, y que los fotones generados por la radiación de sincrotrón son los mismos que aumentan su energía al interaccionar con los electrones que los produjeron en primer lugar.



ALTA RESOLUCIÓN: Las mejoras en el procesamiento de datos han permitido resolver los detalles de algunas fuentes celestes que hasta hace poco solo se veían como un punto en el cielo. Esta imagen del catálogo 3FHL muestra la estructura extensa conocida como Cygnus Cocoon (*marcada con un círculo en el mosaico superior*), en la constelación del Cisne, una zona de rápida formación estelar en la que Fermi ha detectado varios púlsares y otras fuentes de alta energía (*rótulos*). La fuente TXS es un blázar lejano que, por proyección visual, aparece asociado a la galaxia.

Existe un tipo de blázares, conocidos como radiocuásares de espectro plano (FSRQ, por sus siglas en inglés), que revisten gran interés. Ocurre que son muy abundantes en el catálogo 3FGL, en el que se observan cientos de ellos a energías del orden de 1 GeV. Sin embargo, en el 2FHL, a energías más elevadas, prácticamente desaparecen, llegando a encontrarse solo una decena. Este tipo de blázar se diferencia de los mencionados anteriormente en que presentan líneas anchas de emisión en la zona visible del espectro. Estas líneas son producidas por el material frío que cae en el agujero negro rotando a gran velocidad, lo que causa la anchura de la línea debido al efecto Doppler. La existencia de este campo de fotones ópticos cercano a los chorros de partículas tiene como consecuencia que los fotones gamma de muy alta energía son absorbidos en la misma fuente por un efecto conocido como producción de pares, por el que dichos fotones se convierten en pares electrón-positrón. Como consecuencia, no llegamos a detectarlos con nuestros instrumentos.

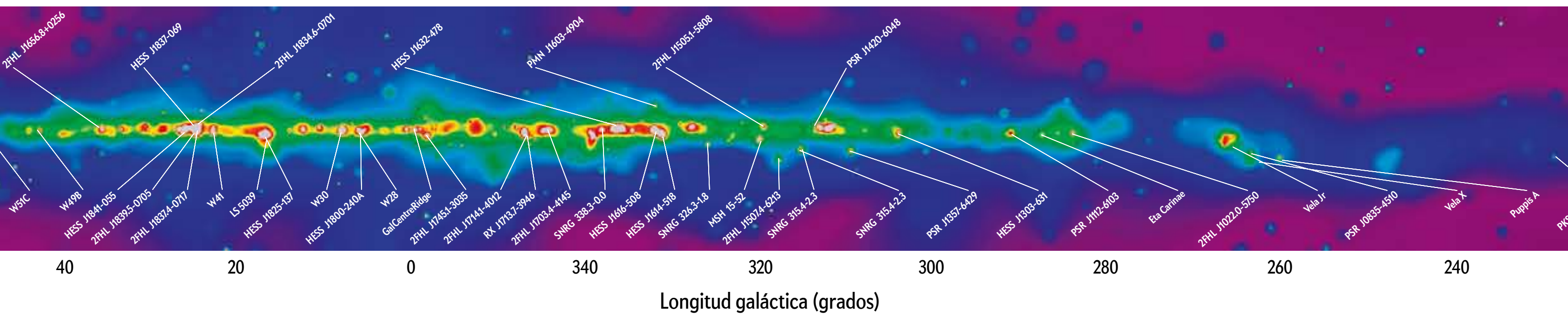
También se han identificado otras fuentes de rayos gamma, conocidas como radiogalaxias debido a sus intensas emisiones en la banda de radio, ubicadas a distancias relativamente cercanas, de pocos cientos de millones de años luz. Estas fuentes constituyen una subpoblación de blázares; sin embargo, debido a su proximidad, somos capaces de ver los chorros de partículas aunque no se hallen directamente alineados con la línea de visión desde la Tierra. Encontramos cuatro radiogalaxias en el muestreo de 2FHL y otras tantas en el de 3FHL.

FUENTES GALÁCTICAS

Alrededor del 10 por ciento de las fuentes catalogadas son objetos pertenecientes a la Vía Láctea. La mayoría corresponden a remanentes de supernova (la estructura que se forma tras la explosión de una estrella masiva) o a un tipo de objetos llamados nebulosas de viento pulsado.

Las estrellas con una masa superior a las ocho masas solares acaban sus días explotando en forma de supernova, lo que probablemente constituya uno de los procesos físicos más violentos

COLABORACIÓN FERMI-LAT/«2FHL: THE SECOND CATALOG OF HARD FERMI-LAT SOURCES», M. ACKERMANN ET AL.; *THE ASTROPHYSICAL JOURNAL SUPPLEMENT SERIES*, VOL. 222, N.º 1, ENERO DE 2016 (*plano galáctico*); ALBERTO DOMÍNGUEZ/COLABORACIÓN FERMI-LAT (*Cygnus Cocoon*)



del universo. Las ondas de choque que se generan en el cataclismo interaccionan con el medio interestelar circundante, lo que acelera partículas que, a su vez, emiten radiación. Algunos de los procesos físicos relevantes son los mismos que hemos mencionado antes: radiación sincrotrón y efecto Compton inverso. A estos se suman otros, como la *Bremsstrahlung*, voz alemana que significa «radiación de frenado» y que hace referencia a la luz emitida cuando un electrón de alta energía pasa cerca de otra partícula con carga eléctrica. Hasta ahora solo hemos hecho referencia a procesos en los que participan electrones, partículas de carga negativa. Sin embargo, los mismos fenómenos pueden darse con protones, de carga positiva, cuyas interacciones son también capaces de generar radiación de muy alta energía. Hoy por hoy, aún existe un debate abierto sobre qué tipo de partículas son las responsables de los principales mecanismos de emisión en los remanentes de supernova.

Hay casos en los que una explosión de supernova da lugar a un púlsar: una estrella de neutrones que rota a gran velocidad. Estos astros presentan una masa dos o tres veces mayor que la del Sol, pero comprimida en un radio del orden de unos diez kilómetros, lo que los convierte en los objetos más densos del universo a excepción de los agujeros negros. Además de girar sobre sí mismos, los púlsares emiten radiación en una dirección bien definida, por lo que radian su luz de modo parecido a como lo hace un faro marítimo; es decir, desde un lugar fijo esta se observa en forma de pulsos regulares. Estas emisiones generan fotones gamma en su entorno más cercano, lo que da lugar a las nebulosas de viento pulsado. El catálogo 2FHL ha permitido localizar cerca de una docena de fuentes de este tipo.

En la colaboración Fermi-LAT hemos hecho un esfuerzo especial para aprovechar la excelente resolución angular conseguida por el instrumento y poder caracterizar así fuentes extensas. Por regla general, las fuentes astrofísicas aparecen en nuestros instrumentos como un punto de luz en el cielo. Sin embargo, en el caso de objetos lo suficientemente cercanos o intensos, hemos logrado resolver su estructura. Una de estas fuentes es Cygnus Cocoon, en la constelación del Cisne. Con una extensión de unos 200 años luz de lado a lado (para hacernos una idea, recordemos que Próxima Centauri, la estrella más cercana al Sol, se encuentra a unos cuatro años luz de distancia), se trata de una zona de la galaxia en la que están naciendo estrellas a un ritmo vertiginoso. En esta región Fermi ha sido capaz de localizar varios púlsares y otras fuentes de alta energía.

UN UNIVERSO DESCONOCIDO

Alrededor de un 10 por ciento de las fuentes detectadas en los nuevos muestreos están aún sin clasificar. Su naturaleza se desconoce, aunque probablemente la mayoría sean blázares. En general, se trata de fuentes no demasiado brillantes y que no se encuentran catalogadas a otras energías. Lo más interesante es que puede que alguna de ellas se deba a un fenómeno que no haya sido observado antes.

Una posibilidad muy emocionante es que entre estas fuentes sin identificar se esconda la primera prueba no gravitacional de la existencia de la materia oscura. Hay modelos muy populares entre la comunidad de física de partículas que predicen la aniquilación de partículas de materia oscura, lo que daría lugar a fotones con energías similares a las detectadas por Fermi-LAT. Quizás algunas de ellas sean galaxias que se muestran muy débiles en otras longitudes de onda por contener pocas estrellas, lo que habría eludido su detección con otros observatorios, como el telescopio espacial Hubble, que opera en el óptico. Varios modelos teóricos predicen que, a pesar de tener pocas estrellas, tales galaxias podrían incluir grandes cantidades de materia oscura. De ser el caso, ello resultaría en una alta tasa de aniquilación de sus partículas constituyentes, lo que generaría una emisión intensa de rayos gamma.

Además de conectar con las observaciones de los telescopios Cherenkov terrestres, la riqueza de los catálogos 2FHL y 3FHL está posibilitando una multitud de estudios de fuentes individuales que, por alguna razón, destacan sobre otras. Estos análisis han lanzado campañas de observación a otras energías, con instrumentos muy diferentes a lo largo de todo el mundo y desde el espacio.

Se espera que Fermi-LAT siga tomando datos en los próximos años. Ello nos permitirá estudiar con más precisión fuentes ya conocidas y descubrir otras nuevas no demasiado intensas. Ese aumento en la cantidad de datos nos facultará también para resolver la estructura de algunas de esas fuentes, sobre todo en nuestra galaxia. Y quizás incluso lleguemos a observar el primer destello de fotones provenientes de la aniquilación de partículas de materia oscura. Diez años después de su lanzamiento, el telescopio Fermi sigue siendo una ventana inestimable hacia un universo aún muy poco conocido. IyC

PARA SABER MÁS

Fermi large area telescope third source catalog. F. Acero et al. en *The Astrophysical Journal Supplement Series*, vol. 218, junio de 2015.
2FHL: The second catalog of hard Fermi-LAT sources. M. Ackermann et al. en *The Astrophysical Journal Supplement Series*, vol. 222, enero de 2016.
3FHL: The third catalog of hard Fermi-LAT sources. M. Ajello et al. en *The Astrophysical Journal Supplement Series*, vol. 232, septiembre de 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

El telescopio Fermi cumple dos años. Néstor Mirabal en *IyC*, junio de 2010.
Las burbujas gigantes de la Vía Láctea. Douglas Finkbeiner, Meng Su y Dmitry Malyshev en *IyC*, septiembre de 2014.
La Red de Telescopios Cherenkov. Juan Cortina y Manel Martínez en *IyC*, mayo de 2016.

por M.ª Dolores Mayán Santos y Marta Varela Eirín

Uniones celulares comunicantes

Mediante diminutos canales, las células se comunican con las demás de forma rápida y sincrónica

Las células pueden «hablar» entre sí a través de señales eléctricas, químicas o metabólicas, así como de complejos sistemas de comunicación, para responder de forma sincrónica y apropiada a los cambios que se producen a su alrededor. Entre esos sistemas destaca el que forman las conexinas, una familia de proteínas que se ubican en la membrana plasmática.

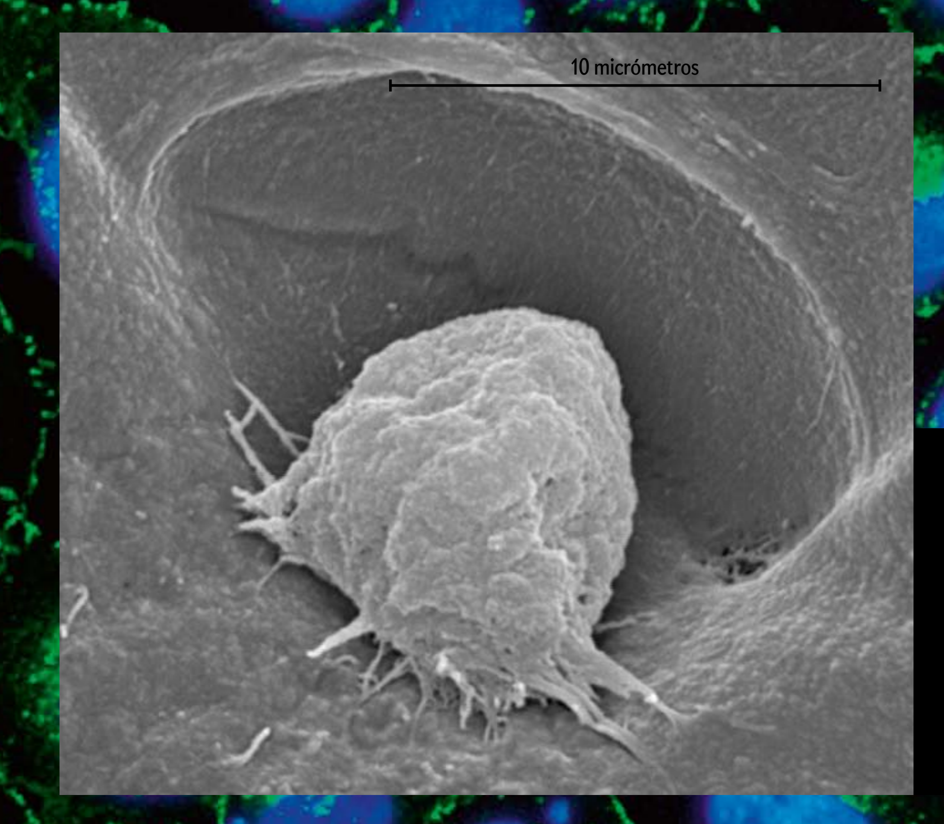
Seis conexinas se unen para crear un hemicanal que permite el intercambio de información entre la célula y su entorno más cercano. Cuando los hemicanales de dos células adyacentes interaccionan, forman un canal continuo, o unión comunicante, que facilita el intercambio directo de moléculas [*véase* «Dinámica y función de las uniones intercelulares» por D. W. Laird, P. D. Lampe y R. G. Johnson; Investigación y Ciencia, julio de 2015]. Las uniones comunicantes permiten el acoplamiento químico, eléctrico y metabólico de un gran grupo de células, que constituyen lo que se conoce como red o sincitio funcional.

Se han descrito hasta 21 tipos de conexinas en humanos, con funciones que varían según el tipo de tejido y de célula en los que intervengan. Las anomalías en la actividad de los canales de conexinas provocan enfermedades neurológicas, cardíacas, vasculares, cáncer o inflamación, así como fallos en la regeneración tisular.

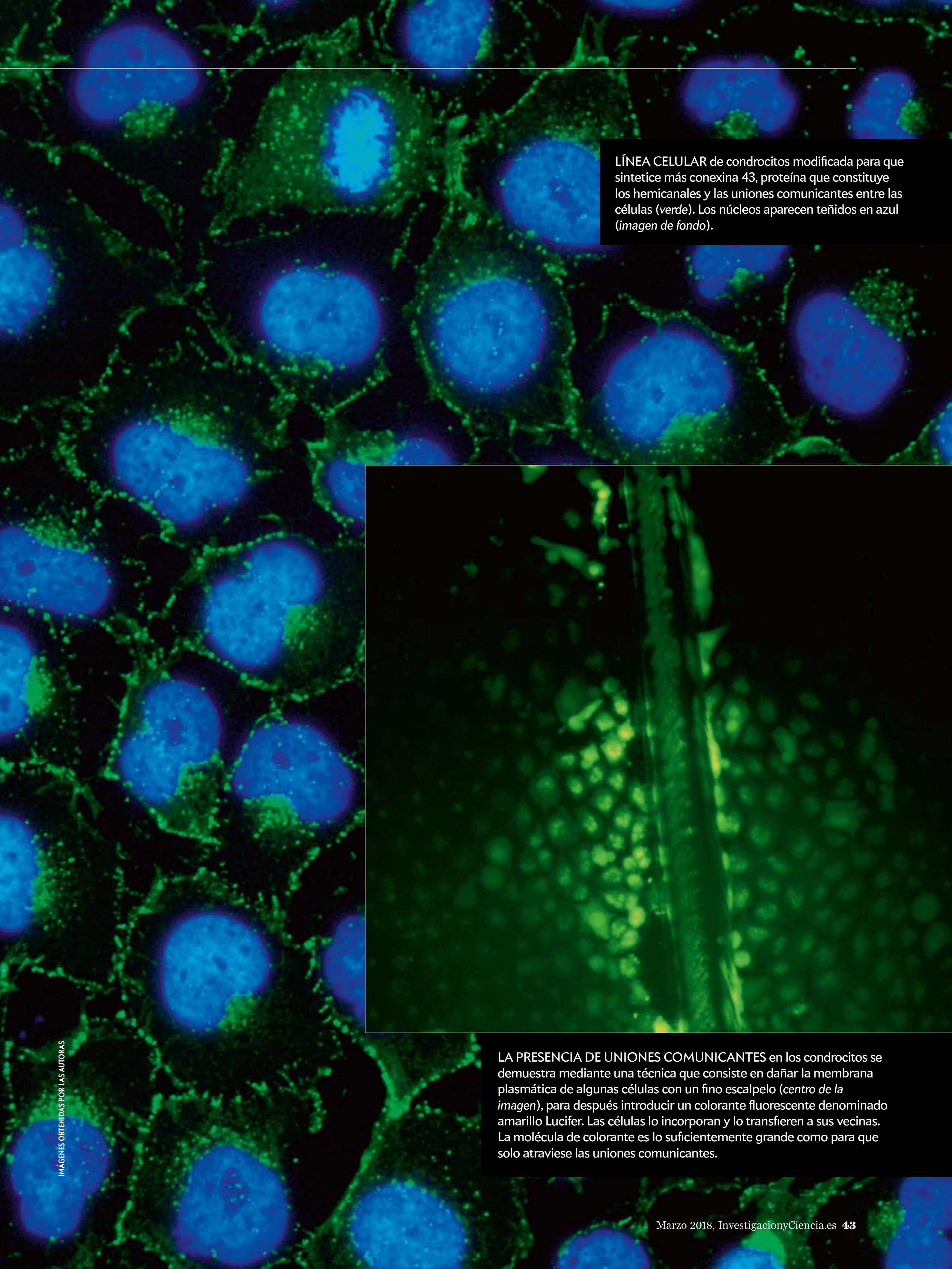
El cartílago articular es el tejido localizado en la superficie de los huesos de las articulaciones móviles y permite el movimiento de estas sin que se produzca dolor. Se ha observado que los condrocitos, un tipo de células del cartílago, presentan niveles elevados de la conexina 43 (Cx43) en los pacientes que sufren artrosis. Ello se ha asociado a un aumento en la comunicación intercelular a través de los hemicanales y las uniones comunicantes.

La sobreactivación de la Cx43 en los condrocitos podría poner en marcha mecanismos de degeneración tisular, al favorecer la pérdida del fenotipo, o identidad, celular. Los resultados de nuestro laboratorio y de otros grupos indican que si se hallaran moléculas que restablecieran los niveles normales de Cx43 y la actividad basal de sus canales, estas podrían ser de utilidad en los pacientes con artrosis, porque evitarían la degradación del cartílago articular y restaurarían los procesos de regeneración del tejido.

—M.ª Dolores Mayán Santos
y Marta Varela Eirín
Grupo de Investigación CellCOM
Instituto de Investigación Biomédica
La Coruña



UN CONDROCITO, de forma redondeada, se fija a la matriz extracelular del cartílago articular mediante numerosas proyecciones y anclajes. La imagen ha sido obtenida mediante microscopía electrónica de transmisión en una sección de cartílago humano.



LÍNEA CELULAR de condrocitos modificada para que sintetice más conexina 43, proteína que constituye los hemicanales y las uniones comunicantes entre las células (*verde*). Los núcleos aparecen teñidos en azul (*imagen de fondo*).

LA PRESENCIA DE UNIONES COMUNICANTES en los condrocitos se demuestra mediante una técnica que consiste en dañar la membrana plasmática de algunas células con un fino escalpelo (*centro de la imagen*), para después introducir un colorante fluorescente denominado amarillo Lucifer. Las células lo incorporan y lo transfieren a sus vecinas. La molécula de colorante es lo suficientemente grande como para que solo atraviese las uniones comunicantes.

por Alfredo Marcos

Alfredo Marcos es catedrático de filosofía de la ciencia en la Universidad de Valladolid.



¿Puede evitarse el fraude en ciencia?

Luces y sombras de los mecanismos de control

La ciencia, como cualquier otra actividad humana, puede verse afectada por el fraude. Por ello, la comunidad científica dispone de procedimientos que tienden a minimizar esta lacra (pensemos en la revisión de artículos por pares o la replicación de experimentos). Pero ¿hasta qué punto estos mecanismos logran evitar las prácticas fraudulentas?

Ciertos casos de fraude científico han llegado a hacerse célebres. Por ejemplo, el de la frenología. Esta disciplina fue fundada en 1796 por el médico alemán Joseph Gall [*véase* «Gall y la frenología», por Albrecht Schöne; Mente y Cerebro n.º 3, 2003]. Se convirtió en una moda intelectual, sobre todo en Gran Bretaña entre 1810 y 1840. En 1820 se creó la Sociedad Frenológica de Edimburgo. Los frenólogos sostenían que podían predecir los rasgos de personalidad de un individuo a partir de la medición de las protuberancias de su cráneo. Incluso se buscó la tipología craneal del llamado «criminal nato». Desde finales del siglo xix, la frenología es considerada una pseudociencia por la comunidad científica.

También dentro de las disciplinas reconocidas como científicas pueden darse casos aislados de fraude. En paleontología tenemos el conocido caso del hombre de Piltdown [*véase* «Una caja de huesos lleva al estafador paleontológico de Piltdown», por Henry Gee; Investigación y Ciencia, septiembre de 1996]. El 18 de diciembre de 1912 se publicó en la prensa británica que el «eslabón perdido» entre hombres y simios había sido hallado. Los restos óseos se presentaron en Londres ante la Sociedad Geológica. Se trataba de un cráneo supuestamente descubierto en Piltdown, al sudeste de Inglaterra. Dicho cráneo pasó a manos de Charles Dawson, arqueólogo aficionado que, junto con Smith Woodward, reconocido paleontólogo del Museo Británico, lo presentó en público. Woodward denominó la nueva especie *Eoanthropus dawsoni*. Los restos guardaban similitudes con los seres humanos y con los simios. Fueron aceptados como válidos por la comunidad científica hasta 1953, fecha en la que el Museo de Historia Natural de Londres reconoció que se trataba de un fraude construido con fragmentos óseos de individuos de distintas especies.



En algunos momentos, el fraude científico ha resultado amplificado merced al respaldo del poder político. Trofim Denísovich Lysenko impuso en la URSS, desde mediados de los años treinta hasta los sesenta, una genética y una práctica agrícola erróneas. En 1964, el físico Andréi Sájarov escribió contra Lysenko en los siguientes términos: «Es responsable del vergonzoso atraso de la biología y la genética soviéticas en particular, por la difusión de visiones pseudocientíficas, por el aventurismo, por la degradación del aprendizaje y por la difamación, despido, arresto y aun la muerte de muchos científicos genuinos».

En las últimas décadas del siglo xx y primeras del xxi, seguimos encontrando casos sonados de fraude científico. En marzo de 1989, Martin Fleischmann y Stanley Pons publicaron en *The Journal of Electroanalytical Chemistry* un artículo que informaba sobre un experimento supuestamente realizado por ellos. Afirmaban haber logrado la fusión fría. Las expectativas suscitadas fueron cayendo con los sucesivos intentos fallidos de reproducir los resultados. Hacia finales de 1989, la mayoría de los científicos consideraba que los datos sobre fusión fría carecían de todo fundamento empírico [*véase* «Fusión en frío: ¿mito o realidad?», por G. Velarde et al.; Investigación y Ciencia, junio de 1989]. Por su parte, en 2004, el surcoreano Hwang Woo-Suk hizo creer al mundo que había conseguido clonar células embrionarias humanas. En diciembre de 2005 se comprobó que sus estudios, publicados en la revista *Science*, se habían basado en datos falsificados.

Si alguna lección podemos obtener de este recorrido sumario, es que, de un modo u otro, los fraudes científicos acaban saliendo a la luz y son entonces corregidos. De hecho, la frenología y el cráneo de Piltdown mantuvieron su crédito durante décadas, mientras que los casos más recientes de la fusión fría o de la clonación humana fueron resueltos en meses. La comunidad científica posee sistemas de autocrítica y de corrección: principalmente, la replicación de experimentos y la revisión de artículos por pares. Ahora bien, dichos mecanismos distan de ser

perfectos. Pueden verse afectados por el poder de las modas y por presiones de todo tipo (ideológicas, políticas, económicas, mediáticas, etcétera).

Para empezar, no todos los experimentos u observaciones son reproducibles por grupos independientes. Resulta difícil replicar una investigación cuando esta exige equipamientos singulares o muy caros, como el Gran Colisionador de Hadrones del CERN, los grandes telescopios, las instalaciones polares o las estaciones espaciales.

Para seguir, el sistema de revisión por pares tiene sus propias debilidades. En 2002, los hermanos Igor y Grichka Bogdanov consiguieron publicar en prestigiosas revistas científicas (*Annals of Physics* y *Classical and Quantum Gravity*) teorías cosmológicas carentes de todo sentido. Otro escándalo similar fue causado por el físico Jan Hendrik Schön, quien engañó a publicaciones con revisión por pares tan prestigiosas como *Nature*, *Science* o *Physical Review*. Escribió en 2002 varios artículos supuestamente revolucionarios sobre superconductividad, que resultaron ser fraudulentos. Y en 2005 se dio el llamado escándalo SCIgen. Tres estudiantes del MIT diseñaron un programa informático denominado SCIgen que generaba textos aleatorios que aparentaban sentido. Algunos artículos fabricados por este programa han pasado el filtro de la revisión por pares en diversos congresos y publicaciones de ciencias de la computación.

Por último, en el marco del caso *Climategate* (noviembre de 2009) salieron a la luz numerosos correos electrónicos atribuidos a climatólogos pertenecientes a la Unidad de Investigación sobre el Clima de la Universidad de East Anglia. En uno de ellos, el entonces director del centro, Phil Jones, admitía su disgusto por el hecho de que la revista *Climate Research* hubiera aceptado artículos de científicos escépticos en materia de cambio climático: «Escribiré a la revista para decirles que no quiero saber más de ellos mientras no echen a este editor problemático», escribe Jones el 11 de marzo de 2003, presionando a la publicación para que despida al editor. Unos meses más tarde, Jones dirige un correo a Michael Mann, de la Universidad de Pensilvania, en estos términos: «No quiero ver ninguno de estos artículos en el próximo informe del IPCC [Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático]. Kevin [Trenberth] y yo los mantendremos fuera como sea, ¡aunque tengamos que redefinir lo que es la revisión por pares!». No se trata aquí de fraude, pero sí, obviamente, de presiones sobre el proceso de revisión por pares.

En las últimas décadas del siglo xx y primeras del xxi, seguimos encontrando casos sonados de fraude científico

También condiciona a los editores el llamado factor de impacto. Los editores de las revistas intentan maximizarlo y, a veces, para hacerlo, privilegian temas que interesan a los medios o a la industria. Por otro lado, la presión que sienten los investigadores jóvenes para publicar hace que los sistemas de revisión por pares se saturen y que muchos científicos hayan empezado a rechazar este tipo de labor arbitral. Con ello, las revistas en ocasiones se ven obligadas a bajar el nivel de sus revisores, o los revisores sobrepasados, el nivel de su trabajo. Las actuales dificultades son de tal calibre que, en opinión de Richard Horton, editor de *The Lancet*, «gran parte de la literatura científica, tal vez la mitad, puede ser simplemente falsa». Y Marcia Angell, exeditora del *New English Medical Journal*, ha llegado a escribir: «Simplemente ya no es posible creer en gran parte de la investigación clínica que se publica».

Quizás el sistema de revisión por pares no está pensado para detectar el fraude y soportar presiones, sino simplemente para evaluar la calidad de la ciencia escrita desde la honradez. Pero dicho sistema ha sido criticado también por la injusticia laboral que esconde. Los revisores y los autores trabajan gratuitamente para revistas que obtienen beneficios vendiendo sus productos a los propios científicos y a sus instituciones. Por no mencionar el hecho de que los científicos de los países menos ricos producen para revistas radicadas en países ricos.

En respuesta a esta situación, algunas instituciones financiadoras, como la UE en su programa Horizonte 2020, ya piden que los resultados sean publicados en el sistema de acceso abierto (*open access*). Se evita así el dudoso modelo de negocio descrito.

Pero este sistema no está exento de problemas. Los ingresos de los medios de acceso abierto no proceden del lector, sino del autor (*pay-per-publish*). Esto reproduce la desigualdad entre científicos de países ricos y científicos de países pobres. Además, rebajar los niveles de calidad para obtener más ingresos empieza a constituir una gran tentación, compensada solo por el miedo a la pérdida de prestigio. Por botón de muestra, recordemos que el biólogo John Bohannon presentó en 2013 un artículo científico ficticio, firmado por un autor inexistente, de una institución inventada, a un grupo de 304 revistas de acceso abierto. En 157 de ellas el trabajo fue aceptado. Más sorprendente es lo que les ocurrió a David Mazières, de Stanford, y Eddie Kohler, de Harvard. Hartos de recibir *spam* de una revista de informática, decidieron enviar para su publicación el artículo titulado «Get me off your fucking mailing list». La revista decidió aceptarlo para su publicación —por solo 150 dólares, eso sí.

Todo ello debería llevarnos a reflexionar sobre la naturaleza falible de los procedimientos científicos. No hay una fórmula mágica para excluir el fraude totalmente de la ciencia. El éxito y la limpieza de la ciencia dependen —como sucede en tantas otras actividades humanas— del sentido común y de la honradez de las personas implicadas. IyC

PARA SABER MÁS

Errores y fraudes de la ciencia y la técnica. Pedro Voltes. Planeta, 1995.
Imposturas intelectuales. Alan Sokal y Jean Bricmont. Paidós, 1999.
Drug companies and doctors: A story of corruption. Marcia Angell en *The New York Review of Books*, 15 de enero de 2009.
Editors, publishers, impact factors, and reprint income. Harvey Marcovitch en *PLOS Medicine*, vol. 7, 2010.
Offline: What is medicine's 5 sigma? Richard Horton en *The Lancet*, vol. 385, 2015.
Revistas científicas: Situación actual y retos de futuro. Ernest Abadal. Edicions de la Universitat de Barcelona, 2017.
Modelling science trustworthiness under publish or perish pressure. David R. Grimes et al. en *Royal Society Open Science*, vol. 5, art. 171511, enero de 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

Riesgos de la nueva bibliometría. Emilio Delgado López-Cózar en *IyC*, abril de 2014.
La tiranía del factor de impacto. Reinhard Werner en *IyC*, marzo de 2015.
Experimentos evanescentes. David Teira en *IyC*, noviembre de 2015.

por Manolis Kogevinas

Manolis Kogevinas es responsable del programa sobre cáncer en el Instituto de Salud Global de Barcelona. Ha trabajado en la Agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer, de la OMS, y ha participado en diversos comités de expertos internacionales para evaluar la toxicidad de varias sustancias.



¿Es cancerígeno el glifosato?

La controversia sobre su seguridad va más allá de las cuestiones científicas

El pasado noviembre, la Unión Europea renovó la licencia del glifosato por otros cinco años. Ello ha generado protestas y ha reavivado el debate acerca de la seguridad del producto. Se trata de un herbicida de amplio espectro y es el plaguicida más utilizado (en 2014 se aplicaron unos 825 millones de kilogramos en todo el mundo). Comercializado por Monsanto con el nombre de Roundup, su uso ha aumentado en los últimos años, sobre todo desde que la empresa desarrolló cultivos genéticamente modificados resistentes al producto. El glifosato se emplea principalmente en la agricultura, pero también en aplicaciones forestales, urbanas y domésticas. Se ha detectado en el ambiente y en los alimentos, aunque la exposición de la población general es muy baja.

En 2015, la Agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer (IARC) de la OMS clasificó el glifosato como «probable carcinógeno» humano (grupo 2A). La clasificación se basó en las pruebas disponibles sobre su efecto en humanos y animales. Estas apuntaban a un aumento del riesgo de linfomas no hodgkinianos en los trabajadores agrícolas, lo que se confirmaba en animales y en estudios experimentales. La categoría de «probable carcinógeno» se usa cuando existen pruebas que no permiten descartar un riesgo pero que tampoco son contundentes.

La evaluación de la IARC del 2015 desató una controversia sin precedentes en la industria y algunos organismos reguladores, como la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria. Se argumentó que las pruebas sobre la carcinogenicidad del glifosato no eran lo bastante sólidas, como sí lo eran las relativas al tabaquismo o las dioxinas. Monsanto inició un ataque contra la IARC y varios científicos independientes que participaron en la evaluación, lo que ha dado lugar a pleitos en los que también han intervenido Gobiernos y organismos reguladores de varios países.

No es ninguna novedad que las pruebas científicas no permitan distinguir de forma clara si existe riesgo de cáncer humano. Los investigadores estamos acostumbrados a convivir con esa incertidumbre e intentamos confirmar o descartar el riesgo mediante nuevos estudios. La ausencia de pruebas contundentes motivó precisamente la clasificación del glifosato como «carcinógeno probable», y no la de «carcinógeno comprobado». Sin embargo, la industria y otros organismos reguladores critican a la IARC que las pruebas sobre el efecto negativo del glifosato son débiles y que este debería haberse clasificado en una categoría inferior, la de «posible cancerígeno» (grupo 2B). La diferencia no es menor, porque las sustancias de ese grupo normalmente no llegan a sufrir regulaciones estrictas por parte de la UE.



Un nuevo y potente estudio de EE.UU. realizado con más de 50.000 trabajadores agrícolas parece apoyar la evaluación de la IARC tras haber identificado un mayor riesgo de un tipo de leucemia (leucemia mieloide aguda). Sin embargo, este cáncer resulta infrecuente en la población, por lo que si existe un riesgo de que el glifosato lo provoque, este será menor y afectará a pocas personas, principalmente a las muy expuestas.

Cuando un producto se clasifica como carcinógeno, la industria suele reaccionar con preocupación e intenta hallar soluciones, aunque a veces también niega los datos. Pero la agresiva respuesta de Monsanto no tenía antecedentes. La IARC, que durante décadas ha llevado a cabo un valioso trabajo en la identificación de cancerígenos y en la prevención del cáncer, ha sido criticada por la industria en varias ocasiones. No obstante, el ataque a causa del glifosato, que también respaldan Gobiernos y algunos medios de comunicación, resulta extraordinario. Investigadores estadounidenses que participaron en la evaluación de la IARC han tenido que proporcionar a la justicia toda la información que tenían (documentos, correos electrónicos) relacionados con el glifosato. La mayoría conservadora del Congreso de EE.UU. está cuestionando la financiación de la IARC por parte de los Institutos Nacionales de la Salud. Al mismo tiempo, los comités de evaluación de otras instituciones que llegaron a conclusiones distintas a las de la IARC han sido criticados por investigadores y organizaciones civiles por la involucración de científicos financiados precisamente por Monsanto.

Se trata de una situación inusual. He participado en calidad de experto en varios comités de la OMS y de otros organismos de Europa y EE.UU. en los que he evaluado pruebas científicas, y se me hace muy difícil trabajar de esta manera. Estoy convencido de que tenemos que promocionar la transparencia de las evaluaciones. Eso sí, sin presiones. Mi preocupación como científico es examinar los datos e intentar prevenir la enfermedad. Las consideraciones económicas son evidentemente importantes, pero pertenecen a otra discusión, no a la científica. Al final, la sociedad y sus instituciones son las que deben decidir si el uso de glifosato se tiene que limitar o no, una decisión que no atañe solo a los científicos.



MEDICINA

CUANDO NUESTRAS DEFENSAS SE VUELVEN CONTRA LOS FÁRMACOS

Muchos de los medicamentos más modernos desencadenan un ataque inmunitario por parte de nuestro propio organismo, que los incapacita

Michael Waldholz

BILL MAYER

Michael Waldholz es periodista especializado en salud. Dirigió un equipo de reporteros que fue galardonado con el premio Pulitzer en 1997 por sus reportajes sobre el sida.



Hasta donde le alcanza la memoria, Ken Martin ha luchado contra la deslealtad de su propio cuerpo, incluso mientras crecía en una pequeña granja de Michigan. Martin, que ahora tiene 50 años, nació con hemofilia y sangra casi sin control cuando se corta. Si sufre alguna lesión en una vena o una arteria internas, la sangre que transportan se acumula debajo de la piel, formando un globo muy doloroso. Cuando le pasa en las rodillas, como ocurre a menudo, se ve obligado a utilizar muletas o una silla de ruedas hasta que la hemorragia se detiene lentamente.

Y, lo que es peor, a Martin su cuerpo le ha supuesto un doble contratiempo. Las personas que padecen hemofilia carecen de un gen que fabrica una proteína esencial para la coagulación de la sangre, y muchas de ellas reciben infusiones periódicas de la molécula que les falta, denominada factor VIII. Pero si Martin recibe una inyección de esta proteína coaguladora, su sistema inmunitario lanza una multitud de anticuerpos contra ella, eliminándola como si se tratara de un microorganismo infeccioso. «Nunca me han ido bien las pautas que llevan factor VIII», afirma Martin, quien, a pesar de su enfermedad, está casado, tiene dos hijos y ha triunfado como ingeniero de diseño en la industria del automóvil. Para tratar las hemorragias, pone en alto la zona inflamada, le aplica hielo y la mantiene en reposo; y le echa mucha paciencia, según cuenta. En los Estados Unidos hay unas 20.000 personas con hemofilia, y alrededor del 30 por ciento de las que padecen el mismo tipo que Martin sufren esos mismos ataques por parte de los anticuerpos.

El problema de los anticuerpos que actúan contra los fármacos (ADA, de *antidrug antibodies*) va mucho más allá de los trastornos de la coagulación. Los ADA suponen un obstáculo para los más recientes medicamentos contra el cáncer, las cardiopatías y diversas enfermedades autoinmunitarias, como la artritis reumatoide. Estos medicamentos, que se denominan biofármacos, imitan a las proteínas naturales. Por eso muchas veces son más eficaces que los fármacos tradicionales, como los comprimidos o píldoras que solemos tomar, que contienen compuestos sintéticos. Pero como nuestro sistema inmunitario funciona para detectar a las proteínas que le son extrañas, algunos pacientes reaccionan a los biofármacos como si se tratara de bacterias invasoras y desencadenan un violento ataque que rara vez se observa con los medicamentos tradicionales. El resultado es que el biofármaco puede ser anulado o destruido antes de que pueda hacer ningún bien.

Los primeros fabricantes de biofármacos pensaron que, dado que muchos de ellos estaban constituidos por genes y proteínas humanos, el sistema inmunitario no los consideraría extraños. Pero esta suposición resultó ser demasiado optimista. Cuando se produjeron reacciones, fueron de tal intensidad que destruyeron al fármaco. El conocimiento de esa respuesta ha despertado alarma, puesto que los biofármacos se han convertido en una parte fundamental de nuestro arsenal médico. Según la empresa de investigación IMS Institute for Healthcare Informatics, en 2002 representaban el 11 por ciento del mercado farmacéutico mundial; en 2017, entre el 19 y el 20 por ciento, y los laboratorios siguen fabricando más. «La explosión de los biofármacos en el mercado y en las líneas de investigación hace que nos preocupen mucho su eficacia y seguridad», afirma Amy Rosenberg, directora de la división que regula las proteínas terapéuticas en la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos de EE.UU. (FDA).

Es probable que la respuesta de los anticuerpos sea el motivo por el que, en algunos estudios, el biofármaco Humira de AbbVie, empleado para tratar la enfermedad inflamatoria intestinal, la psoriasis y la artritis reumatoide, no funcione en una quinta parte de los pacientes o más. El fabricante Pfizer tuvo que retirar un prometedor medicamento contra el colesterol, el bococizumab, tras evaluarlo en más de 25.000 pacientes. Con el tiempo dejaba de surtir efecto en ellos, y en seis ensayos casi la mitad presentaron ADA. Según Paul Ridker, cardiólogo del Hospital Brigham y de Mujeres que supervisó los estudios, la razón probable del fracaso del fármaco fueron los anticuerpos.

En octubre de 2016, los investigadores del Instituto del Cáncer de los Países Bajos, en Ámsterdam, informaron de que más de la mitad de los biofármacos oncológicos que se estaban evaluando en 81 ensayos clínicos en todo el mundo estaban generando anticuerpos, aunque no fue posible determinar si la actividad de

EN SÍNTESIS

Los anticuerpos que actúan contra los fármacos (ADA, de *antidrug antibodies*) son un problema grave y cada vez mayor; desatan una reacción inmunitaria que destruye numerosos medicamentos actuales o suprime sus efectos.

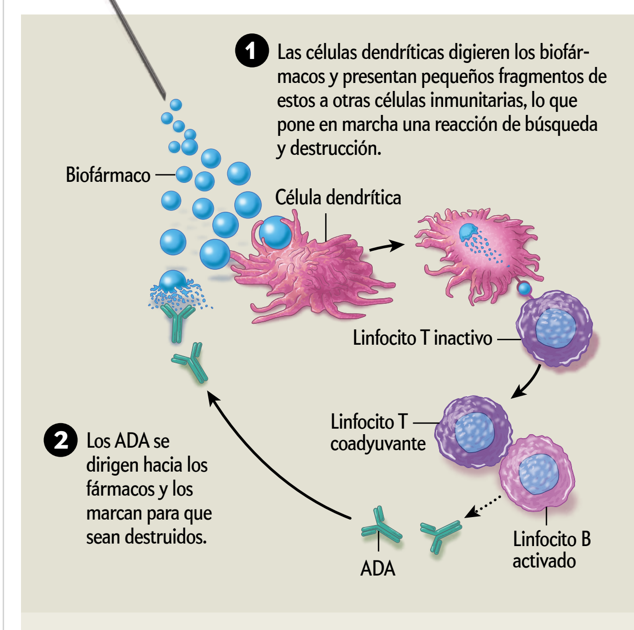
Los fármacos contra el cáncer, las cardiopatías y otras enfermedades graves no funcionan cuando son atacados por estos anticuerpos.

Las nuevas medidas para neutralizar los anticuerpos consisten en enseñar al organismo a tolerar los medicamentos mediante una estrategia similar a la de las vacunas.

RESPUESTA INMUNITARIA

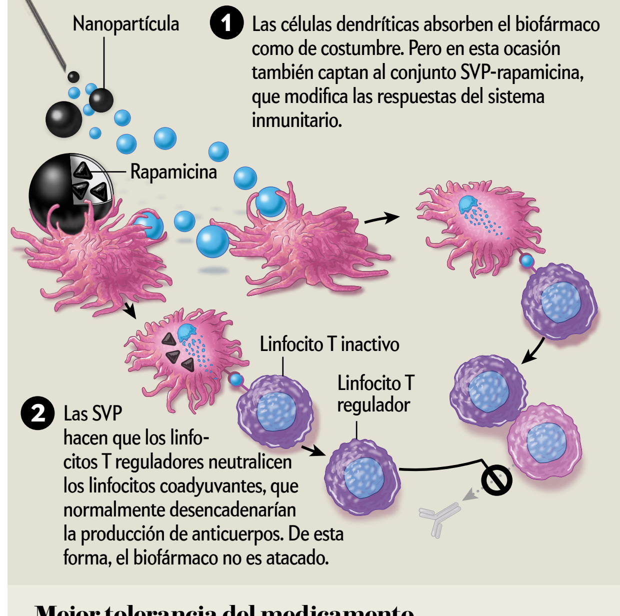
Neutralizar una reacción nociva

Los biofármacos, el tratamiento más moderno contra enfermedades mortales como el cáncer y las cardiopatías, están formados por proteínas. Pero el sistema inmunitario puede reaccionar ante ellas marcándolas para que sean destruidas por anticuerpos que actúan contra los fármacos (ADA, por sus siglas en inglés) (*izquierda*). Una empresa, Selecta Biosciences, está desarrollando partículas de vacuna sintéticas (SVP) que reducen la aversión de nuestras defensas hacia estos medicamentos (*derecha*).



Cuando los anticuerpos atacan

Las células dendríticas reaccionan a los fármacos formados por proteínas como si se tratara de patógenos. Transportan pequeños fragmentos del fármaco hasta los linfocitos T coadyuvantes y los activan. A su vez, estos avisan a los linfocitos B para que fabriquen ADA.



Mejor tolerancia del medicamento

Las SVP son nanopartículas que contienen rapamicina, un modulador del sistema inmunitario. Se inyectan a la vez que el biofármaco. Las células dendríticas captan a ambas moléculas, pero, al hallarlas juntas, no avisan al organismo de que el medicamento es un invasor.

MESA SCHUMACHER

estos perjudicaba al fármaco en todos los casos. En fecha reciente, la empresa suiza F. Hoffmann-La Roche detuvo el desarrollo de una proteína que funcionaba bien como tratamiento de tumores de mama y de pulmón, porque desencadenó la formación de ADA en los estudios iniciales con humanos.

El fracaso de estos fármacos tuvo un alto coste para los pacientes, y también los laboratorios perdieron cientos de millones de dólares. Por eso hay una preocupación generalizada. En 2016, la agencia de Rosenberg pidió a los fabricantes de fármacos que mejoraran sus técnicas de evaluación de los ADA, que analizaran los anticuerpos antes de los ensayos clínicos y en el transcurso de estos, y que informaran de este tipo de reacciones y de su efecto en la eficacia del fármaco y en la seguridad de los pacientes. «Es importante obtener ciertos datos que antes no exigíamos», indica Rosenberg.

Por su parte, los investigadores piden tolerancia, aunque no para los fármacos fallidos. Están desarrollando formas de aumentar la tolerancia del sistema inmunitario hacia las moléculas de los biofármacos. Los inmunólogos, con un enfoque que está suscitando mucho interés, están estudiando maneras de «enseñar» a nuestras defensas a aceptar los nuevos biofármacos, de modo que los perciban como si fueran normales y no como a intrusos. Otras empresas biotecnológicas están dotando de mayor tolerancia a las propias moléculas terapéuticas. Para ello desarrollan fármacos sin los rasgos que desencadenan la respuesta inmunitaria. De hecho, una de ellas está utilizando los mismos anticuerpos para crear medicamentos que provoquen una respuesta de anticuerpos mínima.

DISTINGUIR LOS AMIGOS DE LOS ENEMIGOS

Selecta Biosciences, empresa biotecnológica en las afueras de Boston, está intentando fomentar la tolerancia basándose en los nuevos conocimientos sobre cómo el sistema inmunitario distingue los microorganismos patógenos que debe destruir de las células humanas a las que no debe perturbar. El tratamiento más avanzado de Selecta evitó la respuesta que entorpece la acción de un medicamento para la gota (una forma de artritis incapacitante) en un ensayo clínico. La técnica también se muestra prometedora para aumentar la eficacia de los tratamientos contra el cáncer y las enfermedades genéticas que han sido inhibidos por los ADA, señalan fuentes de la empresa.

«Hemos hallado una forma muy específica de manipular el sistema inmunitario», sostiene Takashi Kei Kishimoto, director científico de Selecta. «Es un logro que los inmunólogos llevaban tiempo persiguiendo.»

La técnica de Selecta tiene sus orígenes en el laboratorio de Ulrich Von Andrian, en la Escuela Médica de Harvard. El experto se ha pasado años desentrañando cómo las defensas del organismo avisan de la presencia de un agente infeccioso en los alrededores. Tras estudiar el modo en que se desplazan

las células inmunitarias por el organismo hasta llegar a un foco de infección, se centró en las células dendríticas, que parecen actuar como oficiales al mando del ejército del sistema inmunitario. Son las responsables de desencadenar una ofensiva contra un patógeno invasor. Cuando una célula dendrítica se topa con un virus o con cualquier otro microorganismo peligroso, transporta un fragmento distintivo del intruso, denominado antígeno, hasta uno de los ganglios linfáticos que hay repartidos por todo el organismo. «Quería estudiar lo que sucede en los ganglios linfáticos para comprender las reglas de la vigilancia inmunitaria», explica Von Andrian.

Desde 1994, el investigador ha utilizado técnicas de imagen cada vez más potentes para hacer un seguimiento del tráfico celular dentro y fuera de los compartimentos linfáticos, en estudios realizados con ratones. Él y sus colaboradores lograron ver que las células dendríticas, como si fueran corredores que se pasan un relevo, comunicaban la identidad antigénica de un patógeno a otros constituyentes del sistema inmunitario, los linfocitos T. Una vez activados, estos desplegaban contra el invasor una serie de mecanismos de combate, entre ellos los anticuerpos.

Hace unos diez años, el equipo de Von Andrian no solo averiguó la forma en que las células dendríticas inician la respuesta inmunitaria, sino también cómo la detienen. Los investigadores estaban estudiando el modo en que la rapamicina, un fármaco que suprime la actividad inmunitaria, ejerce su acción por medio de las células dendríticas. Combinaron la rapamicina con un antígeno de las células del tejido sano, y las células dendríticas captaron el conjunto como de costumbre. Pero en esta ocasión las células se volvieron «tolerógenas», en lugar de luchar activamente contra los merodeadores. Indujeron la aparición de linfocitos T que no estaban activados, sino que aumentaban la tolerancia al impedir que se formaran anticuerpos. Además, estos linfocitos T también suprimían otra función del sistema inmunitario, la inflamación, que puede dañar los tejidos.

SI NO FUERA POSIBLE CONTENER LA RESPUESTA INMUNITARIA, OTRA IDEA SERÍA CREAR MOLÉCULAS QUE NO LA DESENCADENARAN DE MANERA INMEDIATA

A la vista de esta doble naturaleza de las células dendríticas, Von Andrian pensó que, si descubría una forma de promover su acción protectora, podría suprimir las respuestas inmunitarias excesivas que subyacen a las enfermedades autoinmunitarias, como la artritis reumatoide, la esclerosis múltiple o la diabetes de tipo 1. Todas estas dolencias se deben a que el sistema inmunitario ataca por error al tejido sano, de forma muy parecida a como los anticuerpos actúan contra los biofármacos.

Aunque Von Andrian no lo sabía en ese momento, investigadores del cercano Instituto de Tecnología de Massachusetts estaban desarrollando un posible método de comunicación con las células dendríticas (para activar o inactivar la repuesta inmunitaria). El laboratorio del bioingeniero Robert Langer estaba diseñando partículas biodegradables nanométricas, casi tan pequeñas como un virus, que podían adaptarse para que transportaran los fármacos oncológicos por el torrente sanguíneo hasta un foco tumoral. Dichas partículas se convirtieron en la fuente de inspiración de la técnica de Selecta.

Von Andrian, a quien algunos científicos habían solicitado asesoramiento para comercializar las nanopartículas, se dio cuenta de que estas sustancias, compuestas por un polímero soluble denominado ácido poli(láctico-co-glicólico), se podrían muy bien construir de modo que contuvieran un distintivo antigénico que fuera transportado hasta las células dendríticas en los ganglios linfáticos. Pero fue Kishimoto quien pensó en una forma de aprovechar este medio de transporte. «Se me ocurrió que [las nanopartículas] podrían utilizarse para impedir la acción de los ADA», recuerda.

LA ESTRATEGIA DE LA VACUNA

Los investigadores ya habían fundado Selecta y trabajaban en unas «partículas de vacuna sintética» (SVP, por sus siglas en inglés). Kishimoto tuvo la idea de introducir en ellas rapamicina combinada con antígenos de cierto producto biológico. Una vez inyectadas bajo la piel o en un músculo, las partículas alcanzarían los ganglios linfáticos. Allí estimularían a las células dendríticas para que produjeran un aumento de la tolerancia en forma de linfocitos T reguladores, que impedirían la formación de anticuerpos contra cualquier fármaco combinado con la nanopartícula que la compañía investigara.

Selecta puso a prueba la idea para solucionar el problema de los anticuerpos en la hemofilia. Los investigadores administraron nanopartículas que contenían rapamicina y un antígeno del factor VIII a ratones que carecían de él. Y les inyectaron también dicho factor. La intervención redujo el número de anticuerpos contra el factor VIII después de diez tratamientos semanales, según se publicó en 2015 en la revista *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*. (Actualmente, la compañía colabora con investigadores que están desarrollando una terapia génica anticoagulante que se administrará mediante una nanopartícula.)

Satisfecha con los resultados de las SVP, Selecta tiene ahora como objetivo la gota, un tipo de artritis particularmente dolorosa que, si no se trata, puede destruir el hueso y el tejido articular. Unos ocho millones de estadounidenses sufren esta enfermedad, que se produce cuando el ácido úrico se acumula en una concentración muy alta en la sangre y forma cristales. Puede dañar los vasos sanguíneos y los riñones, y los casos graves pueden provocar la muerte.

Existe un tratamiento biológico contra la gota que corresponde a una versión sintética de la uricasa, una enzima que degrada los cristales. La presentan numerosos mamíferos, pero los humanos no. Como resultado, nuestro sistema inmunitario percibe la enzima como extraña. Más del 40 por ciento de las personas tratadas con uricasa generan anticuerpos que neutralizan la acción del fármaco.

El tratamiento con SVP funciona de forma similar al del experimento con el factor VIII. Las nanopartículas contienen uricasa sintética, junto con rapamicina, y se dirigen a las células dendríticas para imponer la paz. Según los resultados de un estudio preliminar en pacientes con gota publicado en el verano de 2017, el tratamiento, administrado una vez al mes, redujo la concentración sanguínea de ácido úrico hasta casi cero sin que se produjeran anticuerpos. «Es una estrategia emocionante», comenta David W. Scott, inmunólogo de la Universidad de los Servicios Uniformados para las Ciencias de la Salud. «Resulta especialmente importante porque funciona activando el proceso de inmunodepresión del propio sistema inmunitario.»

Junto a su colega Kathleen Pratt, Scott está investigando una manera de evitar que los anticuerpos actúen contra un fármaco proteico mediante la genomodificación de linfocitos T reguladores. En un experimento publicado el año pasado, estos linfocitos T diseñados en el laboratorio impidieron la formación de anticuerpos contra el factor VIII en muestras de sangre de donantes sanos, así como en ratones con hemofilia. Sin embargo, la producción comercial de estas sustancias probablemente tardará años, apunta Scott.

SUPRIMIR EL RECHAZO

Si no puede domarse una respuesta inmunitaria antagonista, otra idea para favorecer la tolerancia consiste en diseñar biomoléculas que no activen la respuesta de inmediato. La hemofilia, de nuevo, constituye una enfermedad de interés para este enfoque. Para tratarla, Alnylam Pharmaceuticals en Cambridge (Massachusetts) está desarrollando un fármaco a base de ARN de interferencia (ARNi), una molécula cuyo descubrimiento mereció el premio Nobel de medicina en 2006. Los galardonados, Craig Mello, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Massachusetts, y Andrew Fire, de la Facultad de Medicina de la Universidad Stanford, averiguaron que al inyectar moléculas pequeñas de ARN bicatenario lograban interferir con las moléculas de ARN más largas que suele enviar la célula hasta sus fábricas de proteínas. Como resultado, la célula dejaba de sintetizar ciertas proteínas.

Uno de los primeros fármacos de Alnylam es el fitusirán, un producto que imita la acción de una molécula de ARNi. El fitusirán impide la síntesis de una proteína que interrumpe la acción de la trombina, otra proteína clave en la coagulación sanguínea. Si se desactiva la primera proteína se consigue que el organismo disponga de más trombina, lo que significa más coagulación y menos hemorragia a causa de la hemofilia. En julio de 2017, investigadores de Alnylam publicaron en *New England Journal of Medicine* que una inyección mensual del fármaco durante un ensayo clínico de 20 meses había reducido los episodios hemorrágicos en 25 pacientes con hemofilia.

El valor inmunitario del ARNi como fármaco radica en que, a diferencia de las proteínas, los medicamentos a base de ARN generalmente no inducen la formación de ADA, explica Akin Akinc, quien dirige el proyecto de Alnylam sobre el fitusirán. Y si un estudio más grande demuestra su eficacia, el tratamiento podría estar disponible en 2020. Alnylam también está desarrollando una molécula de ARNi que actúa sobre la misma diana que el problemático fármaco de Pfizer contra el colesterol (abandonado por las frecuentes respuestas de ADA que ocasionaba), pero que no desencadena un ataque de anticuerpos.

Más allá de arremeter contra los invasores, los anticuerpos muestran otras capacidades que ofrecen diferentes soluciones a los problemas farmacológicos que crean. Por ejemplo, pueden unir dos proteínas. Investigadores de la compañía farmacéutica japonesa Chugai fueron los primeros en aprovecharse de este hecho en otra tentativa para tratar la hemofilia; en concreto, para eludir el factor VIII y todos sus inconvenientes. Este factor recibe mucha atención en el diseño de los tratamientos de la hemofilia porque constituye un eslabón esencial en una reacción química en cadena llamada cascada de la coagulación. Promueve la unión de otras dos proteínas, los factores IX y X, un paso clave para formar un coágulo. Pero, por supuesto, también puede atraer anticuerpos destructivos.

Los investigadores han desarrollado un anticuerpo sintético humanizado, denominado emicizumab, que actúa como puente químico entre los factores IX y X, lo que elimina la necesidad del factor VIII. En dos ensayos clínicos publicados el año pasado, se administró una vez por semana para prevenir los episodios hemorrágicos en pacientes con hemofilia que habían generado anticuerpos contra el factor VIII. En los adultos, el fármaco redujo la frecuencia de las hemorragias en un 87 por ciento. En una pequeña parte de los pacientes se produjeron anticuerpos contra el emicizumab. Pero estos ADA aparentemente no alteran la eficacia del fármaco, comenta Gallia Levy, de la empresa biotecnológica Genentech, que comenzó a desarrollar el medicamento con Chugai después de que Roche comprara ambas compañías. Sin embargo, el tratamiento no es perfecto: en algunos pacientes se formaron coágulos que impidieron el flujo sanguíneo normal, y uno murió por un episodio hemorrágico ajeno al fármaco. Aun así, la FDA priorizó su evaluación y lo aprobó en noviembre de 2017.

«Podría convertirse en un medicamento revolucionario», apunta Michael Callaghan, hematólogo del Hospital Universitario Harper, en Detroit, y del Hospital Pediátrico de Michigan, que trata a varios pacientes que participan en ensayos con emicizumab (Callaghan recibe una remuneración de Genentech para debatir sobre este fármaco con otros médicos). Uno de sus pacientes es Ken Martin. «El señor Martin ha mantenido una larga y desafiante lucha», comenta Callaghan. «El fármaco le ha cambiado la vida.»

Martin lo confirma. Durante varios años ha mantenido un registro de sus hemorragias. Explica que antes de unirse a un ensayo sobre el emicizumab, en julio de 2016, sufría una media de 46 episodios hemorrágicos al año. Desde que empezó a recibir el fármaco, solo ha tenido tres. No obstante, todavía padece dolores. Los años de sangre acumulada en sus articulaciones, junto con la inflamación, le han dejado una artritis grave en las rodillas, los tobillos, los codos y los hombros. Espera que los pacientes propensos a presentar ADA puedan evitar tales problemas si comienzan a recibir el fármaco más pronto. Es un hecho que todavía no se ha demostrado. Pero incluso en esta etapa tardía, Martin se muestra satisfecho de haber hallado un remedio con el que poder vivir. «Me siento muy afortunado», afirma. IyC

PARA SABER MÁS

Polymeric synthetic nanoparticles for the induction of antigen-specific immunological tolerance. Roberto A. Maldonado et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 112, n.º 2, págs. E156-E165, 13 de enero de 2015.

Assay development and validation for immunogenicity testing of therapeutic protein products: Guidance for industry. Proyecto de directrices. Agencia Federal de Fármacos y Alimentos de EE.UU., abril de 2016. **www.fda.gov/downloads/drugs/guidancecomplianceregulatoryinformation/guidances/ucm192750.pdf**

Improving the efficacy and safety of biologic drugs with tolerogenic nanoparticles. Takashi K. Kishimoto et al. en *Nature Nanotechnology*, vol. 11, n.º 10, págs. 890-899, octubre de 2016.

Targeting of antithrombin in hemophilia A or B with RNAi therapy. K. John Pasi et al. en *New England Journal of Medicine*, vol. 377, n.º 9, págs. 819-828, 31 de agosto de 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

Interferencia de ARN. Nelson C. Lau y David P. Bartel en *IyC*, octubre de 2003.

Nanocuerpos. W. Wayt Gibbs en *IyC*, octubre de 2005.

ARQUEOLOGÍA

GÖBEKLI TEPE, DE LA TRANSIC

Poco antes de la llegada de la agricultura, en Oriente Próximo se levantaron varios santuarios monumentales. Los investigadores los interpretan como la expresión de un drástico cambio social

Marion Benz

SERIE SOBRE ARQUEOLOGÍA
LUGARES DE CULTO

PARTE 1
NALANDA (BUDISMO)
Max Deeg

PARTE 2
GÖBEKLI TEPE (NEOLÍTICO)
Marion Benz

PARTE 3
TÚMULO FUNERARIO DE ANTÍOCO I (HELENISMO)
Jörg Wagner

PARTE 4
CATEDRALES
Matthias Untermann



ESPEJO
IÓN NEOLÍTICA



DE CAMINO A LA CIVILIZACIÓN: ¿A qué fines servían los monumentales edificios religiosos de Göbekli Tepe, en el sur de Anatolia? Estos gigantescos pilares fueron labrados en piedra caliza, transportados hasta su emplazamiento y decorados, lo que sin duda revela una impresionante labor comunitaria.

Marion Benz es investigadora del Instituto de Arqueología de Oriente Próximo de la Universidad de Friburgo. Estudia los cambios sociales que tuvieron lugar en el Neolítico temprano.



«Cuando me encontré por primera vez entre los gigantescos megalitos me sentí pequeño e insignificante. Me costaba creer que tuvieran 11.000 años de antigüedad», recuerda Oliver Dietrich. Aunque este investigador del Instituto Arqueológico Alemán lleva diez años excavando en Göbekli Tepe, el santuario prehistórico le sigue fascinando como el primer día. La montaña en sí ya tiene algo especial: con sus 800 metros de altura, se yergue en el borde septentrional de la llanura de Harrán, en la Anatolia oriental. Con buen tiempo, la vista se extiende hasta Siria. A lo largo de los últimos veinte años, arqueólogos alemanes y turcos han excavado 6 recintos monumentales en la zona. Y la información suministrada por georradares indica la existencia de otros 14, como mínimo. Se han descubierto monolitos colosales, algunos de más de cinco metros de altura. La mayoría están decorados con artísticos altorrelieves que, en muchos casos, representan animales de aspecto arcaico.

Lo que asombra a los expertos es la antigüedad del complejo. Göbekli Tepe, cuyas excavaciones comenzaron a mediados de los años noventa del siglo pasado, está situado en el extremo septentrional del Creciente Fértil, el arco que se extiende desde el Levante meridional y el norte de Siria hasta Irak. Se considera que en esta región nacieron la agricultura y la ganadería; sin embargo, eso sucedió siglos después de que se construyera el santuario. Entre los huesos de animales hallados en Göbekli Tepe no hay ninguno que pertenezca a un animal doméstico, pero sí a gacelas, uros, asnos salvajes, ciervos y jabalíes. También se han encontrado restos de plantas silvestres. Los constructores de los monumentos eran, por tanto, cazadores y recolectores, a los que nadie hubiese creído capaces de algo semejante. Un proyecto arquitectónico de tales dimensiones hubo de requerir abundante mano de obra durante largo tiempo, así como una estructura social que permitiera coordinarla. Por otro lado, los grupos no sedentarios rara vez han sentido la necesidad de plasmar mensajes en piedra de forma duradera ni de dar a sus ideas una forma arquitectónica.

Entretanto, los investigadores han dado un paso adelante y ya no hablan de «revolución neolítica». De acuerdo con los conocimientos actuales, aquel cambio económico y social en modo alguno se produjo de forma abrupta, sino de manera paulatina y en muchas fases que difieren según las regiones. En el décimo milenio antes de nuestra era, los cazadores y recolectores vivían de lo que les proporcionaba la naturaleza. Pero utilizaban plantas silvestres, y es probable que también animales salvajes. Ello les permitió adquirir los conocimientos necesarios para, más tarde, cultivar plantas y criar animales domésticos. También vivían en asentamientos, al menos de forma estacional, aunque aún no empleaban recipientes de barro para conservar, preparar o presentar los alimentos. Los inicios del santuario de Göbekli Tepe se remontan, por tanto, a la fase del Neolítico temprano precerámico (9600-8600 a.C.).

COMPLEJIDAD EXTRAORDINARIA

En un principio, a los prehistoriadores les resultó difícil dar crédito a lo que los arqueólogos comandados por Klaus Schmidt, fallecido en 2014, y su sucesor Lee Clare, del Instituto Arqueológico Alemán, habían sacado a la luz. Canteros y albañiles tuvieron que haber trabajado y vivido en aquella meseta durante muchos meses para levantar aquellas construcciones.

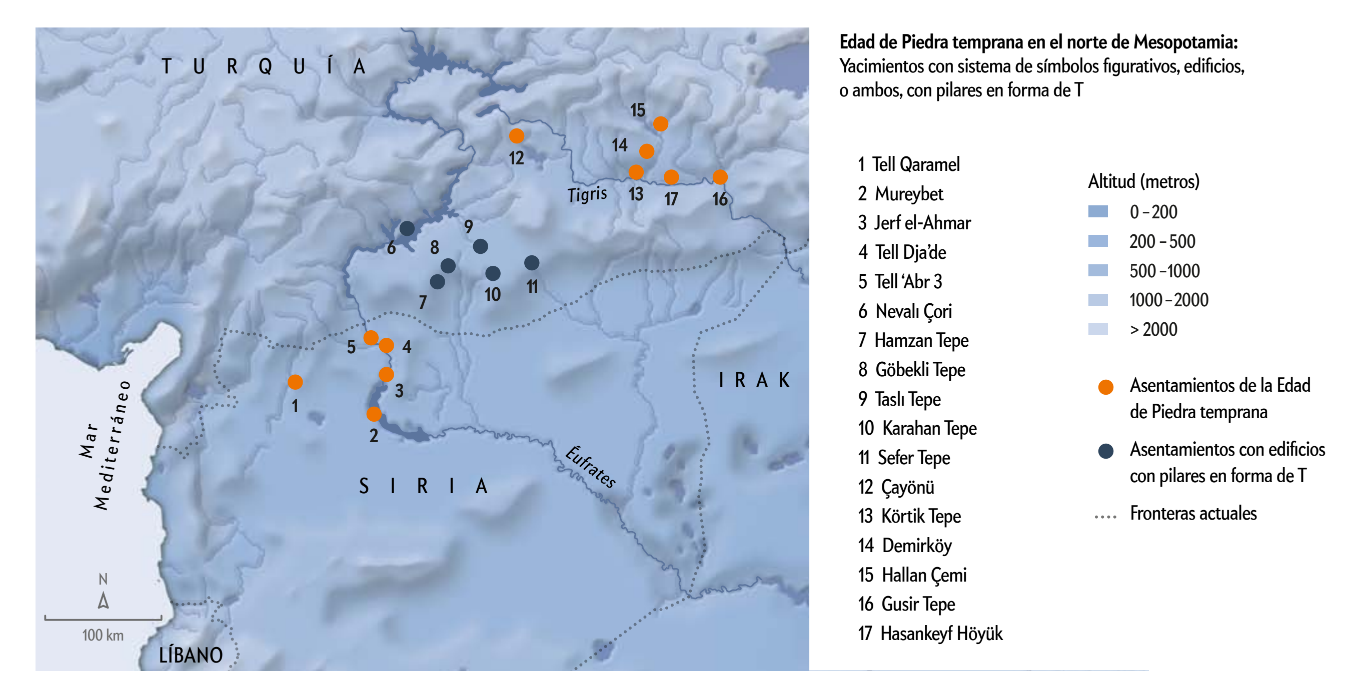
«La piedra caliza usada para los pilares aparece en la estratigrafía de la montaña», apunta Dietrich. «La extraían del borde de la meseta, por lo que era accesible lateralmente.» Su equipo encontró un ejemplar que se fracturó cuando intentaban obtener una pieza bruta del banco calizo. Aquel pilar debía haber medido siete metros de altura. El hecho de que se malograra fue una bendición para los arqueólogos, pues conservaba huellas que han permitido conocer las técnicas empleadas. «Primero cincelaron en la roca la pieza en forma de T y, a continuación, separaron las piezas brutas —probablemente con ayuda de palancas— del es-

EN SÍNTESIS

Hace más de 11.000 años, grupos de cazadores y recolectores construyeron en Oriente Próximo varios centros de culto de gran tamaño. Sus características parecen reflejar el incipiente cambio hacia una vida sedentaria.

Uno de los principales santuarios es el de Göbekli Tepe, en la actual Turquía. El tipo concreto de rituales que se practicaban en él y en otros centros de la zona se desconoce, si bien varios indicios apuntan a prácticas chamánicas.

Buena parte de los edificios de carácter religioso fueron destruidos o enterrados deliberadamente. Los investigadores interpretan este hecho como prueba del establecimiento de una economía agrícola y ganadera.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT/EMDE-GRAFIK

VERTIENTE FÉRTIL: En la Mesopotamia del décimo milenio antes de nuestra era, los cazadores y recolectores encontraron gran cantidad de animales salvajes y plantas comestibles. Ello impulsó el sedentarismo y propició la aparición de numerosos asentamientos.

trato situado debajo. Desconocemos cuál sería el paso siguiente, pero lo más probable es que transportaran los megalitos hasta su emplazamiento mediante rodillos de madera.» Estudiantes de la Universidad de Halle han intentado labrar, en otro lugar, un pilar de piedra caliza similar. Según sus cálculos, habrían tenido que trabajar veinte personas durante varios meses.

La forma de T confería a los monolitos un aspecto humano, en el que el travesaño superior representaba la cabeza. En algunos ejemplares los canteros dotaron al tronco de brazos doblados en ángulo, mientras que otros los decoraron con esculturas y relieves de animales. Según parece, los artistas tenían muy claro cuál debía ser el aspecto de la pieza acabada. «Los altorrelieves muestran tal precisión que solo pudieron salir de la mano de personas muy expertas», añade Clare.

Los pasos siguientes exigían asimismo experiencia y coordinación. Los edificios redondos estaban incrustados en el suelo hasta dos metros y revestidos con muros levantados sobre el lecho rocoso. Probablemente se utilizaron rampas de tierra para transportar los pilares hasta su emplazamiento y cuerdas para izarlos. En el centro había dos pilares de gran tamaño; otros estaban colocados en nichos a lo largo del muro. Para algunos de los pilares centrales se excavaron auténticos fosos de cimentación. Otros los colocaron en hoyos, pero como estos no eran lo suficientemente profundos para mantenerlos en su sitio, tuvieron que recurrir, o bien a puntales, o bien a tejados de madera.

El arquitecto e historiador Dietmar Kurapkat, de la Escuela Técnica Superior de Ratisbona, se inclina por la techumbre, pues, en su opinión, las precipitaciones de otoño e invierno habrían acabado por inundar los edificios. Otro argumento a favor de esta teoría lo aporta el buen estado de conservación de los relieves: de haberse hallado a la intemperie, la piedra caliza habría sufrido un deterioro mucho más acusado.

La mayoría de los edificios carecen de puerta de acceso. Se han encontrado losas con aberturas, pero, al parecer, ninguna en el lugar donde fueron colocadas originalmente. Kurapkat defiende que se accedía a los edificios por agujeros practicados en el tejado, como si se tratara de una entrada al inframundo. A la luz de antorchas y hogueras para iluminar la semioscuridad, el recinto tenía que adquirir un aspecto aún más mágico. En el centro se erguían los dos megalitos más altos. Ornamentados con cinturones, taparrabos que parecían ser de piel de zorro o de pantera, y un chal sobre los hombros, tenían que cobrar una apariencia especialmente digna. Sin embargo, las cabezas de los pilares en forma de T se dejaron anónimas, probablemente a propósito. Ningún rasgo (ni boca ni ojos) desvelaba la identidad de aquellos seres de piedra. Nadie podrá saber jamás si los colosos pretendían ser representaciones de dioses, antepasados o héroes. Por esta razón, los investigadores evitan, al menos por ahora, calificar los edificios de Göbekli Tepe como «templos», ya que, por definición, estos se erigen en honor de alguna deidad. Adosados al muro exterior circular había otros pilares con abundantes relieves de animales. De ellos se cernían amenazadoras serpientes, escorpiones, panteras y leones, entre otros. También en las paredes sobresalían cuerpos de animales; a la trémula luz del fuego, tales figuras proyectarían sombras en movimiento.

«Las construcciones tan monumentales como esta han sido siempre una demostración de poder», explica Joachim Bauer, neurobiólogo del Hospital Universitario de Friburgo que colabora en la interpretación del santuario y sus detalles. «Por otra parte, un esfuerzo tan colosal une a las personas, incluidos los espectadores, que sin duda se sintieron atraídos por semejante espectáculo. Siempre se persigue pertenecer a una comunidad capaz de obras grandiosas.»

La simple provisión de mano de obra representaba un reto logístico. Según estimaba Schmidt, el transporte de un pilar requeriría la intervención de 300 hombres. La construcción de un edificio con doce pilares y muros sería impensable sin la existencia de un trabajo conjunto organizado. Semejante esfuerzo tenía que obedecer a una finalidad importante. Los arqueólogos suponen que, en tanto que centro de culto y ritual,



ESCULTURA COMPLEJA: Entre los escombros de algunas casas de Nevalı Çori, en la actual Turquía, se han encontrado partes de esculturas de gran tamaño, algunas de ellas con rostro. Hoy por hoy los investigadores desconocen su significado. La cabeza de la imagen mide unos 30 centímetros de altura.

el santuario mantenía cohesionados a los distintos grupos que vivían en la zona.

SANTUARIOS HERMANOS

Aunque se trata de las más impresionantes conocidas hasta ahora, las de Göbekli Tepe no son, sin embargo, las únicas edificaciones monumentales de la Edad de Piedra en el Creciente Fértil. A finales de los años cincuenta del pasado siglo, la arqueóloga británica Katheleen Kenyon excavó en Jericó una torre de nueve metros de altura de la misma época, considerada hasta hoy una de las construcciones más antiguas levantadas por una comunidad.

Arqueólogos sirios y franceses han descubierto en el curso medio del Éufrates, al norte de la actual Siria, otros santuarios levantados hacia la misma época que el complejo de Göbekli Tepe que, sorprendentemente, muestran un gran parecido con este. A finales de los años noventa, Danielle Stordeur, prehistoriadora de la Casa de Oriente de Lyon, descubrió varios de estos edificios singulares en el yacimiento de Jerf el-Ahmar. En Tell ‘Abr 3, pocos kilómetros Éufrates arriba, su colega sirio Thaer Yartah halló otras ruinas similares. Sepultados en el terreno, a casi dos metros de profundidad, encontró edificios redondos con una sola estancia y un banco adosado a lo largo del muro interior. Huellas de desgaste características confirman que se trataba de estructuras donde se sentaban personas. Bajo ellos, los arqueólogos han hallado también vasijas de piedra, huesos de animales, abalorios y pequeñas placas de piedra decoradas. Especialmente ilustrativas resultaron las cavidades y los restos de revoque. Según parece, en los bancos se empotraron postes de madera de hasta 30 centímetros de diámetro que, en parte, sobresalían del borde delantero. Algunos se revistieron de barro. ¿Se pretendía con ello conseguir una apariencia pétrea que recordara al santuario de Göbekli Tepe?

Las pruebas parecen indicar que, en el décimo milenio antes de nuestra era, los habitantes del norte de Mesopotamia compartían ritos y símbolos muy similares, los cuales constituían un fuerte vínculo de unión entre ellos. Según han demostrado las excavaciones e investigaciones de los últimos veinte años, toda la región se hallaba densamente poblada. Los cazadores y recolectores encontraron en ella una mesa muy bien surtida, por lo que prolongar la estancia en la zona aportaba importantes ventajas. Los primeros asentamientos se establecieron a orillas del Éufrates, del Tigris y de sus afluentes. Allí no faltaban animales salvajes ni aves acuáticas, al tiempo que los ríos proporcionaban pesca en abundancia. Estos primeros poblados eran reducidos, en pocos casos superaban las dos hectáreas y en ellos vivían entre 150 y 300 personas.

Centenares de moletas y morteros confirman que allí se establecieron grupos humanos de forma permanente, pues es seguro que vasijas de piedra tan pesadas como las que se han encontrado no se transportarían a largas distancias. Estos objetos constituyen además un importante indicio del uso intensivo de plantas silvestres. Los pistachos, las bellotas, las almendras y las semillas de gramíneas proporcionaban las calorías necesarias. Los estudios arqueobotánicos de los últimos años apuntan la posibilidad de que en Körtik Tepe, uno de los poblados más antiguos a orillas del Tigris, se cultivaran incluso cereales silvestres. Los análisis genéticos de la espelta actual señalan también a esta región como la fuente original de nuestros cereales.

Con todo, la cercanía del agua era una bendición cargada también de desdichas: los niños y los adultos de Körtik Tepe padecían inflamación crónica del oído medio, como ha descubierto Yilmaz Erdal, del Instituto Antropológico de Ankara. Muchos pequeños morían y, salvo excepciones, los adultos no vivían más de 35 años. La muerte formaba parte de la vida cotidiana. Vecihi Özkaya, director de las excavaciones, y su equipo han hallado entretanto más de 800 esqueletos bajo el suelo de las casas prehistóricas, una cifra inusualmente elevada.

Algunos de los difuntos fueron enterrados con un ensordecedor ceremonial: espléndidas vasijas de piedra lujosamente decoradas, así como hachas y cabezas de mazas, se destruían intencionadamente para colocar los fragmentos sobre el muerto. Con toda seguridad, nadie olvidaría un ritual semejante. Algo que no deja de llamar la atención es que en casi ninguno de estos edificios se hayan encontrado hasta ahora enterramientos tradicionales. En una de las mayores construcciones de Jerf el-Ahmar, Stordeur halló dos cráneos aislados, lo que podría considerarse

ARCHIVO ÉUFRATES DE HEIDELBERG

una especie de ofrenda fundacional. Habían sido colocados en dos agujeros superpuestos del poste del recinto sagrado.

Una tercera calavera apareció escondida en un nicho del muro de otro edificio. La sorpresa mayor se encontraba, sin embargo, a pocos pasos de allí, donde se hallaron los huesos de una mujer joven. Como si hubiera sido arrojada al centro de la estancia, yacía boca arriba con los brazos y las piernas extendidos. Poco después, el edificio fue pasto de las llamas. ¿Fue víctima de un sacrificio? ¿Fue su muerte el motivo de que incendiaran la casa? Pero hay otro enigma más: al esqueleto le faltaba la cabeza; sin embargo, las cervicales estaban intactas, lo que los antropólogos interpretan como que el cráneo fue retirado cuando ya no estaba unido a ellas. Dicho con otras palabras: mucho tiempo después de la muerte de la mujer, alguien sabía exactamente dónde tenía que buscar la calavera entre los restos del incendio.

En su momento, Schmidt especuló con la posibilidad de que, entre otros aspectos, el santuario de Göbekli Tepe desempeñara un papel relevante en el culto a los muertos. Según esta teoría, algunos cadáveres se exponían deliberadamente en la cima de la colina para que fueran devorados por buitres y otras aves rapaces de gran tamaño. Un rito funerario similar se practicó mucho más tarde en el zoroastrismo, una de las religiones monoteístas más antiguas, la cual probablemente se desarrolló en el segundo milenio antes de nuestra era en Asia central. Los huesos de buitres y cuervos hallados en el material de relleno del santuario podrían respaldar la teoría de Schmidt. No obstante, hasta ahora apenas se han encontrado restos de esqueletos humanos, lo que parece contradecirla.

TRANSICIÓN SOCIAL

¿Para qué servían entonces aquellos edificios, ya se trate de casas redondas en una aldea o de un complejo monumental en una altiplanicie? Stordeur los califica de «edificios comunitarios», pues la presencia de ciertos artefactos, como moletas, confirma que allí se preparaban y se ingerían alimentos entre varias personas. Las cámaras de menor tamaño de algunas construcciones podrían interpretarse como despensas colectivas. Sin embargo, esta interpretación «mínima» no satisface a numerosos investigadores: las representaciones figurativas parecen demostrar que este tipo de edificaciones monumentales desempeñaban un papel clave en el conjunto de creencias del Neolítico precerámico. Al igual que en los pilares y otros restos de Göbekli Tepe, también en Körtik Tepe se conjuraba a serpientes, escorpiones y aves representándolos en objetos, desde vasijas de piedra y colgantes de hueso hasta pequeñas placas de clorita.

Dichos animales no formaban parte del botín de los cazadores ni vivían en el mismo mundo que los seres humanos: las serpientes acompañan al inframundo, los pájaros dominan el aire y las aves acuáticas controlan ambas esferas. Algunos son peligrosos, como el jabalí o la pantera. Asimismo, es probable que a los ojos de los cazadores del norte de Mesopotamia, el zorro no fuera solamente un competidor. En algunos mitos de Asia Oriental se lo considera el acompañante de una diosa y un demonio ambiguo al que había que aplacar con ofrendas y sacrificios. Los animales peligrosos o místicos desempeñan un papel relevante en el chamanismo, tal y como lo practican en la actualidad varios grupos. En unos casos, los chamanes actúan como guías en el mundo de los espíritus; en otros, se convierten ellos mismos en esos animales para, por ejemplo, averiguar el origen de una enfermedad. Es posible que en un recipiente de piedra de Körtik Tepe se represente la imagen de un hombre disfrazado de pájaro. Por otra parte, los cuervos de las esculturas de Göbekli Tepe tienen piernas humanas. Miles de años más tarde, en el séptimo milenio antes de nuestra era, figuras semejantes se representaron también en Çatalhöyük, un asentamiento de Turquía central.

Hoy en día nadie se atreve a describir el efecto que tanto la arquitectura monumental como las esculturas ejercían sobre los habitantes de la Edad de Piedra. «En un mundo escaso en imágenes, causarían sin duda una poderosa impresión», asegura Dietrich. Esas imágenes formaban un lenguaje simbólico común que entendían todos los habitantes de la región comprendida entre el Éufrates superior y medio y el Tigris, el cual se hallaba profundamente arraigado en sus mentes.



¿CHAMANES, CURANDEROS O BRUJOS? Las representaciones de seres humanos resultan muy poco comunes en el Neolítico precerámico. Esta vasija hallada en el yacimiento de Körtik Tepe, en las orillas del Tigris, constituye una pieza excepcional.



MENSAJES DURADEROS: Es muy probable que estas placas de piedra de pocos centímetros contuvieran mensajes cifrados en forma de símbolos. De este modo, los conocimientos se transmitían a través de largas distancias.

ARCHIVO DE KÖRTIK TEPE (*vasija*); EXCAVACIÓN FRANCO-SIRIA DE JERF EL-AHMAR, DIRIGIDA POR DANIELLE STORDEUR Y BASSAM JAMMOUS, MISIÓN A EL-KOWM-MUREYBET DEL MINISTERIO FRANCÉS DE ASUNTOS EXTERIORES (*placa*)



¿CULTO FUNERARIO? En este edificio del yacimiento de Jerf el-Ahmar, en la actual Siria, los arqueólogos han hallado varios cráneos y el esqueleto de una mujer. Los investigadores especulan con la posibilidad de que algunas de estas construcciones desempeñasen un papel relevante en el culto a los muertos.

EXCAVACIÓN FRANCO-SIRIA DE JERF EL-AHMAR, DIRIGIDA POR DANIELLE STORDEUR Y BASSAM JAMMOUS, MISIÓN A EL-KOWM-MUREYBET DEL MINISTERIO FRANCÉS DE ASUNTOS EXTERIORES

Con todo, aquel mundo se encontraba en un proceso de cambio, lo que comenzó a amenazar sus tradiciones. Los poblados crecieron y empezaron a aparecer tensiones sociales. Había que prever reservas y restringir el consumo. El aumento del tamaño de los grupos trajo la imposibilidad de compartir todo con todos, y, con ello, la desaparición de los contactos personales estrechos y de la confianza.

«Con el desarrollo de una nueva forma de vida caracterizada por la creciente producción de alimentos, los asentamientos centrales de las sociedades arcaicas de cazadores, como Göbekli Tepe, perdieron su importancia», resume Harald Hauptmann, director de las excavaciones de Nevalı Çori, un asentamiento que fue testigo de aquel cambio. A finales de los años ochenta se excavó una construcción de 188 metros cuadrados situada en la ladera. Al igual que en Göbekli Tepe, en el centro de la estancia se levantaban originariamente pilares, mientras que varios nichos abiertos en el muro albergaban columnas monolíticas. Este edificio fue construido hacia la mitad del noveno milenio antes de nuestra era, cuando ya se practicaba la agricultura y se criaban ovejas, cabras y cerdos.

Las prácticas religiosas incluían el mantenimiento y la reforma constante de los centros de culto, pero también su enterramiento final: muchos se limpiaron y se abandonaron, mientras que otros fueron quemados. El complejo de Göbekli Tepe fue sepultado deliberadamente. Y, si no hubiera quedado protegido contra la intemperie, no cabría explicar el excelente estado de conservación de las esculturas después de más de 11.000 años. ¿Acaso se pretendería que la colina que cubría el antiguo santuario evocara los tiempos gloriosos de los cazadores y recolectores?

En una fase posterior, entre los años 8600 y 8000 a.C., se levantaron nuevos santuarios en los alrededores del recinto protegido, pero ninguno llegó a ser tan impresionante: los pilares apenas medían dos metros de altura y las figuras de animales peligrosos no se tallaron con la misma minuciosidad. En casi todas las cumbres de las montañas que rodean la llanura de Harrán, los arqueólogos turcos han hallado en prospecciones superficiales pilares en forma de T parecidos a los de Göbekli Tepe, aunque de menor tamaño. Sin duda, ya no se requería un trabajo conjunto tan laborioso. La vida en el poblado se había establecido, la agricultura y la ganadería determinaban ahora el día a día y el regreso al pasado era impensable. IyC

PARA SABER MÁS

Sie bauten die ersten Tempel. Klaus Schmidt. C.H. Beck, 2006.

On scorpions, birds and snakes: Evidence for shamanism in Northern Mesopotamia during the Early Holocene. Marion Benz y Joachim Bauer en *Journal of Ritual Studies*, vol. 29, págs. 1-24, 2015.

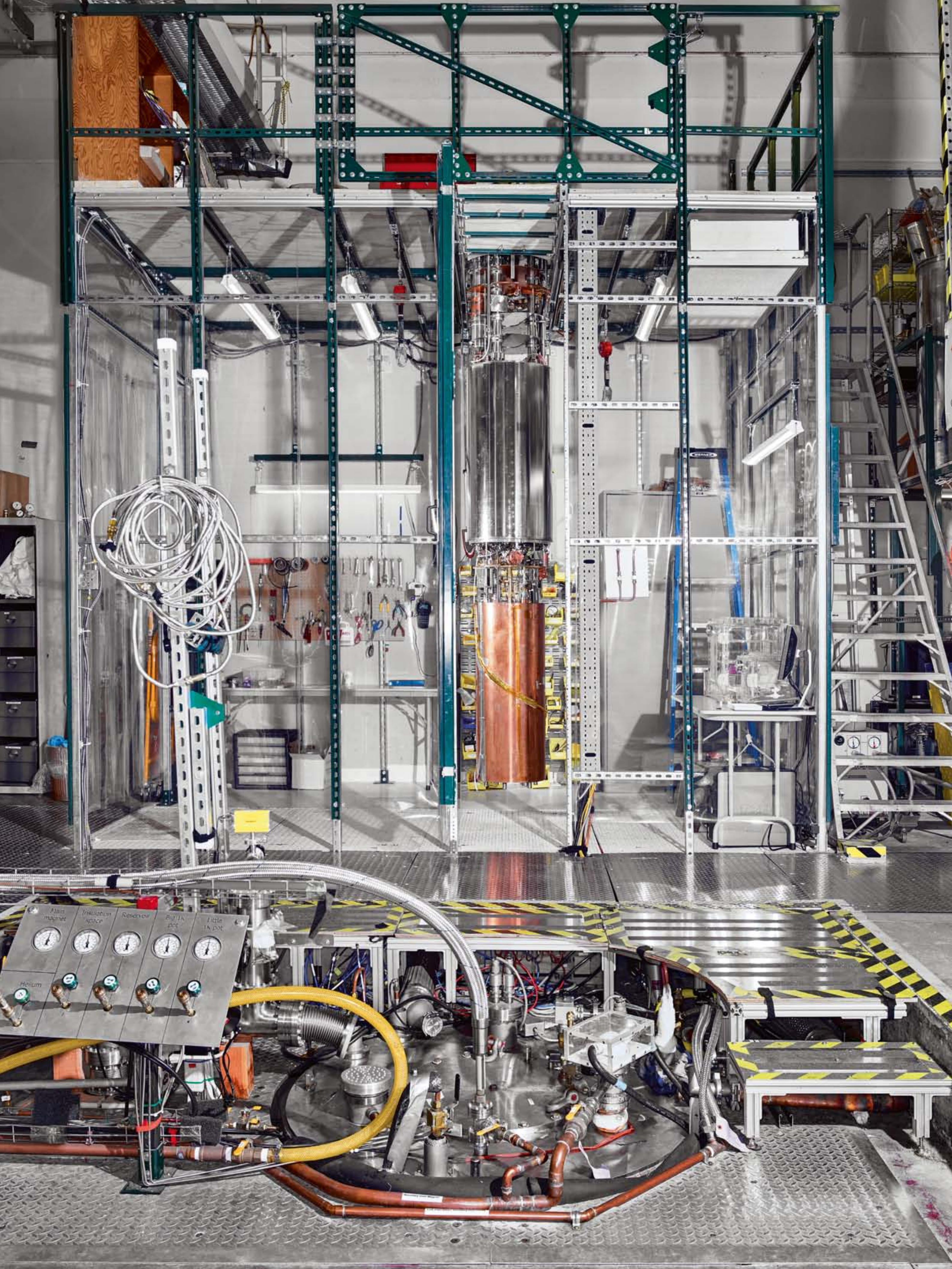
Le village de Jerf el Ahmar (Syrie 9500-8700 avant J-C): L'architecture, miroir d'une société néolithique complexe. Danielle Stordeur. CNRS Editions, 2015.

Typologie de bâtiments communautaires à Tell 'Abr 3 (PPNA) en Syrie du Nord. Thaer Yartah en *Neo-Lithics*, febrero de 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

El hombre neolítico y la muerte. Alain Gallay en *IyC*, octubre de 1991.

El origen del Neolítico. Juan José Ibáñez en *IyC*, noviembre de 2009.



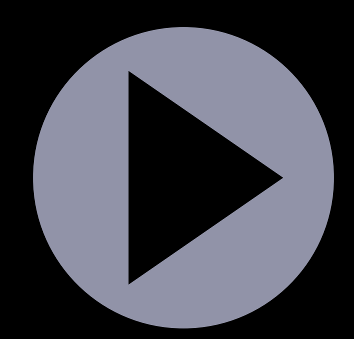
Main magnet
Insulation space
Reservoir
Big 1K pot
Little 1K pot
Helium

MATERIA OSCURA AXIÓNICA

ASTROPARTÍCULAS

Después de veinte años, el experimento ADMX acaba de entrar en la fase de mayor sensibilidad. Su objetivo: detectar ciertas partículas ultraligeras que explicarían la masa oculta del universo

Leslie Rosenberg



AL FONDO DE ESTA IMAGEN aparece el instrumento principal del experimento ADMX en una sala blanca. El dispositivo se introducirá después en un agujero (*cubierto, en primer plano*) para comenzar una nueva tanda de mediciones.

FOTOGRAFÍAS DE IAN ALLEN



Leslie Rosenberg es catedrático de física de la Universidad de Washington. Lleva más de dos décadas investigando la posibilidad de que la materia oscura se componga de axiones.

EL UNIVERSO SE COMPONE EN SU MAYOR PARTE DE UNA SUSTANCIA QUE NO PODEMOS VER.

Esa fue la conclusión a la que comenzaron a llegar los astrónomos de los años treinta del siglo xx al estudiar los cúmulos de galaxias. Todo indicaba que estas grandes estructuras cósmicas deberían disgregarse a menos que hubiese algún tipo de «materia oscura» que las mantuviese cohesionadas. La idea ganó fuerza en los años setenta, cuando el análisis de la velocidad a la que rotaban las galaxias individuales sobre sí mismas sugirió lo mismo. Pronto quedó claro que era poco probable que esa materia invisible estuviese formada por materia y radiación ordinarias. Hoy, casi nadie pone en duda que en torno al 90 por ciento de toda la masa existente en el universo corresponde a una sustancia exótica, tal vez formada por algún tipo de partícula elemental aún desconocida y que quedó como vestigio de la gran explosión.

Durante largo tiempo, las candidatas más populares para explicar la materia oscura fueron las denominadas «partículas masivas que interaccionan débilmente», más conocidas como WIMP, por sus siglas en inglés. Sus supuestas propiedades encajan muy bien con la muy apreciada y especulativa hipótesis de la supersimetría. No obstante, los experimentos diseñados para detectarlas no han encontrado nada, a pesar de llevar décadas buscándolas y de haber alcanzado una gran sensibilidad. Sin duda, es aún demasiado pronto para descartar que las WIMP puedan dar cuenta de la materia oscura. Sin embargo, los resultados nulos de los últimos años han impulsado a muchos investigadores a dirigir su atención hacia otras posibilidades.

Un candidato menos conocido es el axión: una partícula muchísimo más ligera que las WIMP, pero que, como estas, apenas interaccionaría con la materia ordinaria. Si la materia oscura estuviese formada por axiones, estos abundarían a nuestro alrededor, pudiendo llegar a las decenas o incluso centenas de billones por centímetro cúbico. Sus únicos efectos sobre el resto del universo se ejercerían a través de la gravedad: su masa conjunta sería tan elevada que bastaría para explicar las órbitas de las estrellas en las galaxias y el movimiento de estas en los cúmulos galácticos.

Durante más de veinte años he formado parte del Experimento sobre Materia Oscura Axiónica (ADMX), concebido para buscar tales partículas. En todo este tiempo no hemos dejado de mejorar nuestros medios técnicos. En 2016, el ADMX entró en una nueva fase. Ahora ha alcanzado la sensibilidad suficiente para, o bien detectar axiones, o bien descartar las versiones más verosímiles de estas partículas en un plazo de cinco o diez años; un hito que pronto nos dará respuestas de gran interés en uno u otro sentido.

EL ORIGEN DE LOS AXIONES

Cuando aún cursaba mi doctorado, en los años ochenta, los axiones acababan de ser propuestos como posible solución a cierto problema de la cromodinámica cuántica (QCD). Esta teoría describe la interacción fuerte (la responsable de mantener cohesionados los núcleos atómicos) y, hasta hoy, ha mostrado un excelente acuerdo con los experimentos. Sin embargo, adolece de un inconveniente conocido como «problema de CP fuerte», donde CP significa «carga y paridad». La teoría parece indicar que, si invirtiésemos la carga y la paridad de una partícula (es decir, si reemplazásemos una partícula por su antipartícula, y esta por su imagen especular), el resultado debería seguir unas reglas físicas diferentes. Sin embargo, hasta ahora nadie ha visto que eso ocurra. Este desacuerdo entre las observaciones y las

EN SÍNTESIS

Hace años que los físicos intentan averiguar qué clase de partículas componen la materia oscura, la misteriosa sustancia que llena el cosmos y que ejerce una intensa atracción gravitatoria sobre las galaxias.

Una posibilidad que hasta hace poco ha sido poco estudiada es el axión. Esta hipotética partícula fue propuesta en los años setenta para resolver cierto problema de la teoría de las interacciones fuertes.

El Experimento sobre Materia Oscura Axiónica (ADMX), en la Universidad de Washington, ha alcanzado hace poco la sensibilidad necesaria para confirmar o descartar las versiones más plausibles de estas partículas.

expectativas teóricas de la QCD indica que podríamos estar pasando por alto algo importante.

En 1977, Helen Quinn y Roberto Peccei, a la sazón en Stanford, se percataron de que el problema de CP fuerte podía resolverse de una manera simple y elegante. Para ello recurrieron a la idea de ruptura de simetría, un concepto muy usado en física. En ocasiones, la naturaleza no parece mostrar una simetría que, por otro lado, creemos que sí debería tener. Por ejemplo, si colocamos un lápiz en posición vertical sobre una mesa, existe una simetría rotacional por la cual debería ser igual de probable que el objeto se desplomase en una u otra dirección. Pero ¿y si observáramos que nuestro lápiz cae siempre hacia el mismo lado? En tales casos decimos que la naturaleza ha «elegido» una de las posibilidades y que la simetría inicial «se ha roto». En el contexto de física de partículas, cuando esto ocurre aparece una nueva partícula. (Las simetrías a las que nos estamos refiriendo no tienen por qué ser evidentes; en general, se trata de simetrías abstractas relacionadas con la formulación matemática de la teoría.)

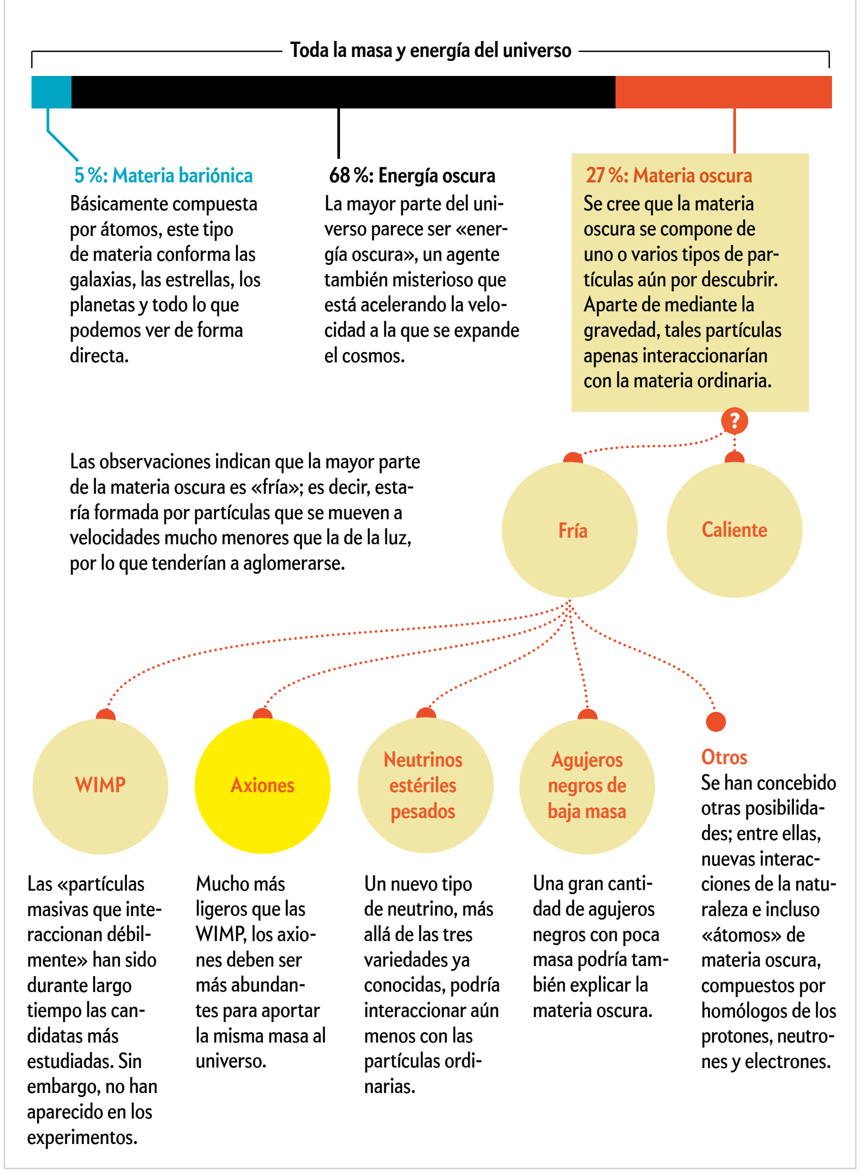
Quinn y Peccei aplicaron esta idea a la QCD. Propusieron que la interacción fuerte tenía asociada una simetría oculta que se había roto. Dicha ruptura ocurría de tal modo que, de manera natural, anulaba la diferencia de CP que sugería la teoría inicial, lo que explicaría por qué esta no se observaba en los experimentos. Problema resuelto.

Poco después, Steven Weinberg, hoy en la Universidad de Texas en Austin, y Frank Wilczek, del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), señalaron que, al igual que en otros procesos de ruptura de simetría, el mecanismo de Peccei y Quinn implicaba la existencia de una nueva partícula: el axión (según el folclore de la disciplina, el nombre fue tomado del de un detergente porque la nueva partícula «limpiaba» el problema de CP fuerte). Más tarde, a mediados de los años ochenta, los teóricos concluyeron que la gran explosión pudo haber generado la cantidad suficiente de axiones para dar cuenta de la materia oscura.

TEORÍA

Aspirantes a materia oscura

Una sustancia invisible, la materia oscura, parece estar ejerciendo una intensa atracción gravitatoria sobre las galaxias y los cúmulos de galaxias. Pero ¿de qué se compone? Los físicos barajan varias posibilidades para explicar la naturaleza de esta sustancia, la cual daría cuenta de cerca del 25 por ciento de toda la materia y energía existente en el cosmos.



JEN CHRISTIANSEN

La teoría no establece cuál tendría que ser la masa del axión ni con cuánta intensidad debería interaccionar este con la materia ordinaria. Sin embargo, sí sabemos que, en caso de existir, los axiones han de ser muy inertes, puesto que de lo contrario ya habrían aparecido en los colisionadores de partículas o en otros experimentos. Por otro lado, si apenas interaccionan con la materia normal, lo más probable es que sean también muy ligeros.

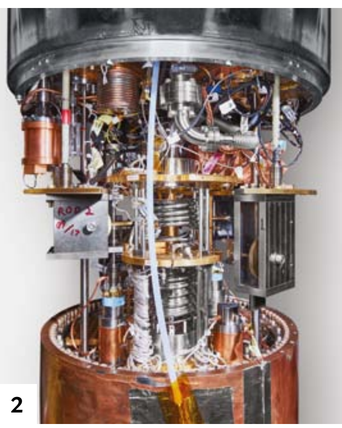
En 1987, un importante suceso astrofísico permitió acotar en gran medida su masa. Aquel año se observó una supernova en la Gran Nube de Magallanes, una galaxia enana cercana a la Vía Láctea. La explosión emitió una ingente cantidad de neutrinos, algunos de los cuales fueron detectados en la Tierra. No obstante, si los axiones tuviesen una masa mayor de algunos milielectronvoltios (meV, del orden de la milmillonésima parte de la masa del electrón), se habrían generado en aquel cataclismo y habrían alterado el tiempo de escape de los neutrinos. Dado que esto no se observó, pudimos concluir que la masa del axión debía ser inferior al meV.

Un axión tan ligero apenas interaccionaría con la materia ordinaria o con la radiación. Por ejemplo, una partícula rela-

tivamente común, el pión neutro, tarda unos 10^{-16} segundos en desintegrarse en dos fotones. Un axión ligero necesitaría 10^{45} años para hacer lo mismo, un tiempo muchísimos órdenes de magnitud mayor que la edad del universo. El axión sería, con gran diferencia, la partícula más inerte de todas las que conocemos.

No obstante, si la masa del axión fuese demasiado pequeña, surgirían otros problemas. Debido a los entresijos del proceso que creemos que generó los axiones poco después del comienzo del universo, cuanto menor es la masa del axión, mayor es la densidad de masa del conjunto de todos ellos. Por tanto, si la masa de esta partícula fuese inferior a cierto umbral, en la gran explosión se habrían producido muchos más de los necesarios para dar cuenta de la materia oscura. Hay importantes incertidumbres relacionadas con este proceso, y se han propuesto varias ideas ingeniosas para eludir el problema. Pero, en mi opinión, resultaría muy improbable que el axión tuviera una masa muy inferior al microelectronvoltio (μeV).

En resumen: el axión no puede ser muy masivo, puesto que entonces ya lo habríamos observado en los aceleradores de partículas o por sus efectos en la evolución de las estrellas; pero tampoco muy ligero, ya que en tal caso habría demasiada materia oscura. Determinar con exactitud el abanico de masas posibles resulta complicado, pero parece razonable suponer que se halle entre el μeV y el meV. Sin embargo, los axiones en este intervalo de masas interaccionarían tan poco con las partículas ordinarias que han sido calificados como «invisibles».



LOS CIENTÍFICOS conectan sensores al instrumento principal del ADMX (*1*). Sobre su cavidad recubierta de cobre hay un depósito de helio líquido que rodea la electrónica (*2*).

LA GRAN IDEA DE SIKIVIE

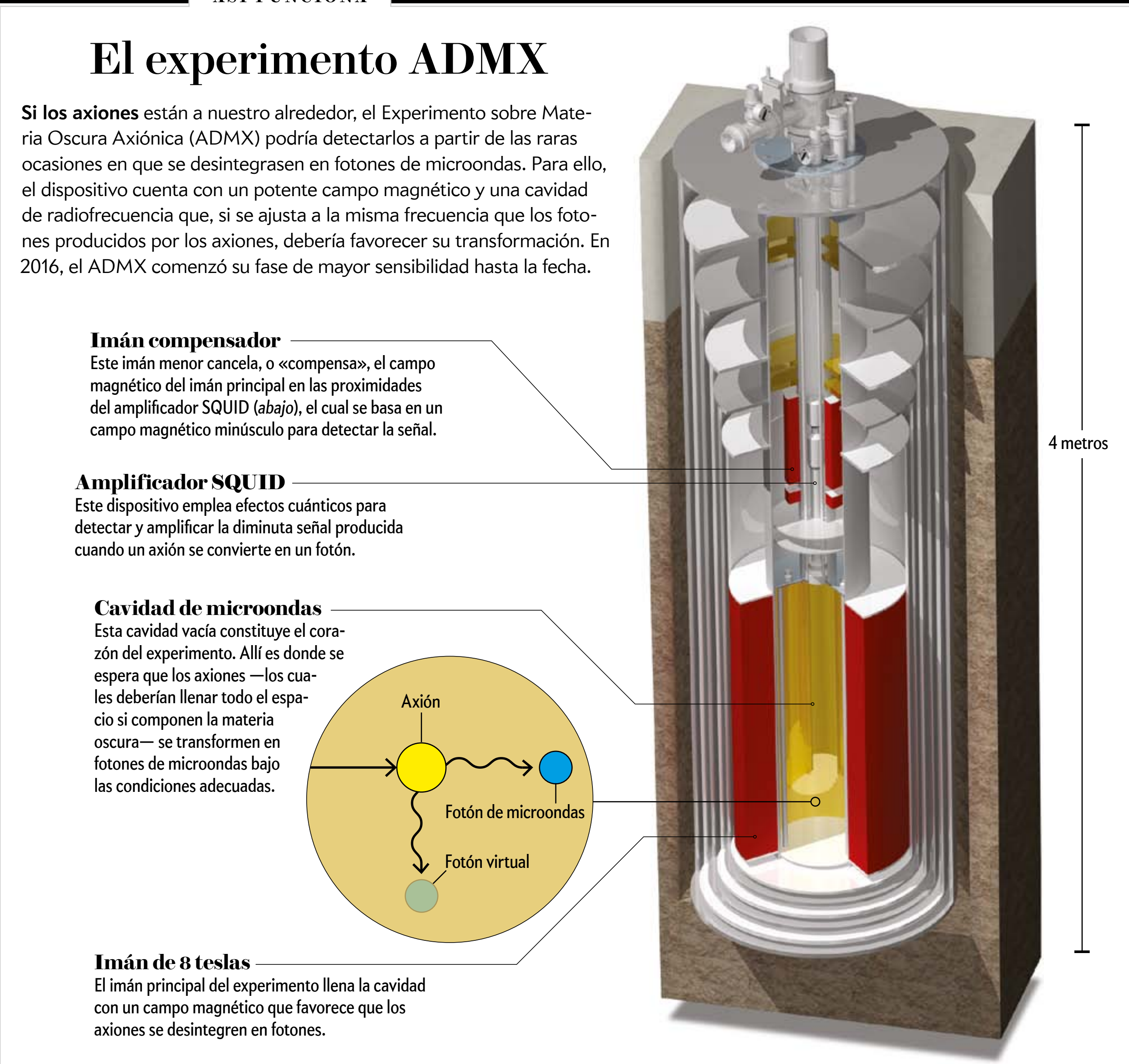
Cuando se postularon los axiones, los físicos de Stanford y otros lugares comenzaron a buscarlos en los colisionadores de partículas. No obstante, las mismas propiedades que hacen del axión un candidato atractivo para constituir la materia oscura (su débil interacción con la materia ordinaria y la radiación) parecían abocar tales búsquedas al fracaso. Era frustrante pensar que podíamos estar inmersos en un mar de diez billones de partículas por centímetro cúbico, que, sin embargo, resultaban imposibles de detectar.

Entonces Pierre Sikivie, de la Universidad de Florida, tuvo una gran idea: en lugar de intentar crearlos en los aceleradores, tal vez pudiésemos detectar los axiones cósmicos que conforman el vasto mar de materia oscura que nos rodea. Sikivie imaginó un campo magnético en el interior de una cavidad cilíndrica completamente vacía, excepto por los axiones que, supuestamente, impregnan todo el espacio. Cada vez que un axión interaccionase con el campo magnético, casi toda su energía se convertiría en un fotón. Y la probabilidad de que dicha interacción se produjese aumentaría si ajustábamos la cavidad para que resonara con la misma frecuencia que el fotón producido por el axión. Dado que la masa de los axiones es diminuta, y que los axiones cósmicos que nos rodean probablemente se muevan a velocidades similares a las del resto de la Vía Láctea, su energía sería minúscula, por lo que la frecuencia del fotón resultante se hallaría en el espectro de las microondas. No obstante, su valor exacto seguiría envuelto en misterio mientras no

ASÍ FUNCIONA

El experimento ADMX

Si los axiones están a nuestro alrededor, el Experimento sobre Materia Oscura Axiónica (ADMX) podría detectarlos a partir de las raras ocasiones en que se desintegrasen en fotones de microondas. Para ello, el dispositivo cuenta con un potente campo magnético y una cavidad de radiofrecuencia que, si se ajusta a la misma frecuencia que los fotones producidos por los axiones, debería favorecer su transformación. En 2016, el ADMX comenzó su fase de mayor sensibilidad hasta la fecha.



DON FOLEY

conociésemos la masa del axión. Por ello, sería necesario ajustar continuamente la frecuencia de resonancia de la cavidad para «barrer» todo el abanico de masas posibles, con la esperanza de dar en algún momento con el valor correcto.

La señal resultante sería muy débil, tal vez de 10^{-21} vatios o menos, y vendría acompañada de una cantidad aproximadamente igual de ruido. Pero, con detectores de microondas muy sensibles y que observasen la señal durante un período suficiente de tiempo, debería ser posible llegar a buen puerto. Dos de mis grandes pasiones han sido siempre la radioelectrónica y la física de partículas, por lo que las ideas de Sikivie encajaban a la perfección con mis intereses.

NACE EL ADMX

Completé mi doctorado en Stanford en los años ochenta, bajo la influencia de las ideas de Quinn y Peccei, y los axiones me impactaron sobremanera. Parecían resolver dos grandes misterios de la física: el problema de CP fuerte y el de la materia oscura. Y, tras el artículo de Sikivie, parecía que había una manera de detectarlos.

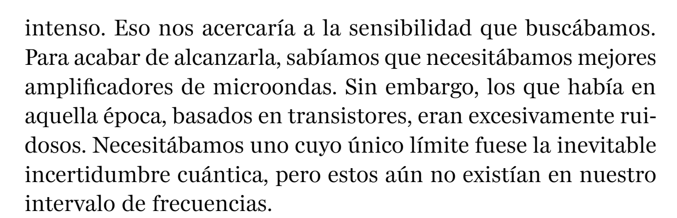
De Stanford me trasladé a la Universidad de Chicago, donde tuve el privilegio de trabajar bajo la dirección del difunto James W. Cronin. Allí tuve noticia de los primeros intentos de poner en práctica la idea de Sikivie; entre ellos, el experimento de Rochester-Brookhaven-Fermilab y un proyecto en la Universidad de Florida. Aunque ninguno de ellos gozaba de la sensibilidad necesaria para detectar axiones en el intervalo de masas plausible, desarrollaron la tecnología básica que usarían todos los experimentos posteriores.

Mientras estaba en Chicago comencé a hablar con Karl van Bibber, por entonces en el Laboratorio Nacional Lawrence Livermore, y David Tanner, de la Universidad de Florida, y nos dimos cuenta de que podíamos mejorar aquellos experimentos usando una cavidad con un gran volumen y un campo magnético





ESTANTES con los dispositivos electrónicos de microondas del ADMX que funcionan a temperatura ambiente (*1*). Los ingenieros estudian los datos del experimento (*2*).



intenso. Eso nos acercaría a la sensibilidad que buscábamos. Para acabar de alcanzarla, sabíamos que necesitábamos mejores amplificadores de microondas. Sin embargo, los que había en aquella época, basados en transistores, eran excesivamente ruidosos. Necesitábamos uno cuyo único límite fuese la inevitable incertidumbre cuántica, pero estos aún no existían en nuestro intervalo de frecuencias.

De esta manera se concibió el programa ADMX: comenzaríamos con un gran imán, los mejores amplificadores de microondas disponibles y helio líquido para enfriar el experimento a 4,2 grados kelvin y reducir el ruido. A medio plazo, nos centraríamos en desarrollar amplificadores de microondas que operasen en el límite cuántico. A largo plazo, añadiríamos un «refrigerador de dilución»: un sistema que enfriaría la cavidad y los amplificadores a temperaturas de unos 100 milikelvin, lo que reduciría aún más el ruido. Se trataba de un programa ambicioso; cada fase nos llevaría en torno a una década. Por fortuna, contábamos con el respaldo del Departamento de Energía de EE.UU. para llevar el proyecto a término.

LOS PRIMEROS AÑOS

En 1993 me trasladé al MIT, donde formamos una colaboración para comenzar el proyecto. El laboratorio de Livermore proporcionó un gran imán superconductor y el lugar donde se llevaría a cabo el experimento. Wolfgang Stoeffl, físico de gran talento de Livermore, diseñó el sistema criogénico inicial, el cual seguimos usando hoy en gran parte. Tanner fue en buena medida quien concibió y desarrolló los entresijos del experimento a partir del primer proyecto de la Universidad de Florida, y nuestro grupo del MIT construyó un receptor de microondas de muy bajo ruido para detectar la señal. En 1998 publicamos los resultados iniciales de esta temprana «fase 0» del ADMX, el primer experimento sensible al tipo de axión que podía explicar la materia oscura. No habíamos encontrado las escurridizas partículas, pero habíamos comenzado con buen pie.

Mientras tanto, seguíamos avanzando en la búsqueda de un amplificador sensible a las débiles señales de microondas que esperábamos de los axiones. Por entonces asistí a una charla de John Clarke, brillante físico de la Universidad de California en Berkeley. Clarke había estado trabajando en dispositivos superconductores de interferencia cuántica (SQUID), los cuales aprovechan el efecto túnel: la capacidad de una partícula cuántica para atravesar barreras que un objeto macroscópico no podría franquear. Si se generase un fotón en el experimento, induciría en el SQUID un pequeño campo magnético que alteraría dicho efecto túnel de manera perceptible. Aquellos dispositivos gozaban de una sensibilidad exquisita, pero aún no podían usarse con microondas. Para ese fin, Clarke desarrolló un sistema conocido como «amplificador SQUID de corriente continua de microtira», cuya astuta geometría le permitía funcionar a frecuencias más elevadas.

El plan era prometedor, pero aún persistían algunas dificultades. Los diminutos campos magnéticos causados por la señal en el SQUID quedarían eclipsados por el intenso campo que llenaba la cavidad del ADMX. El Departamento de Energía revisó nuestro plan y calificó el problema del SQUID como de «alto riesgo». Llegados aquí, a principios de 2002, me trasladé a Livermore y decidimos dividir el ADMX en dos fases: la «1a» demostraría

que los SQUID podían funcionar en el potente campo magnético del experimento; la «1b» añadiría el refrigerador de dilución que enfriaría el experimento a las temperaturas requeridas.

Comenzamos la fase 1a desarrollando un sistema para proteger el SQUID del enorme campo magnético del experimento. Ello fue posible gracias a una serie de blindajes e imanes concéntricos, y a una «bobina compensadora», un gran imán que cancelaría, o «compensaría», el campo magnético principal. Hacia 2005 habíamos demostrado que la técnica funcionaba y comenzamos a trabajar en el refrigerador de dilución, el principal elemento de la fase 1b.

EL EXPERIMENTO CRECE

Por aquel entonces me trasladé a la Universidad de Washington, y el experimento se vino conmigo a un emplazamiento nuevo y notablemente mejor. Mientras tanto, el Departamento de Energía y la Fundación Nacional para la Ciencia de EE.UU. estaban buscando ideas para detectores de materia oscura «de segunda generación». La mayoría de los que tenían en mente se referían a las WIMP, pero también estaban interesados en los axiones. Nuestros planes para la fase 1b del ADMX encajaban muy bien en el programa, y de este modo nació el ADMX Gen 2, cuyas operaciones comenzaron en 2016 y que está previsto que funcione hasta 2021. Este por fin cuenta con el refrigerador de dilución y ha aumentado a más del doble el ritmo efectivo de recogida de datos. También hemos introducido elementos esenciales para aumentar la sensibilidad, por lo que ahora podemos efectuar lo que llamamos la «búsqueda definitiva»: un barrido a lo largo de un intervalo de masas del axión de entre 1 y 40 μeV, lo que incluye la región ideal prevista para los axiones candidatos a componer la materia oscura.

Hoy la colaboración ha crecido hasta incluir al laboratorio de Livermore, la Universidad de California en Berkeley, la de Florida, la de Washington, la de Washington en San Luis, el Laboratorio Nacional del Noroeste del Pacífico, Los Álamos, el Fermilab, el Observatorio Nacional de Radioastronomía y la Universidad de Sheffield, en el Reino Unido. Hay un nuevo equipo al frente, con Gray Rybka, de la Universidad de Washington, y Gianpaolo Carosi, de Livermore, como coportavoces.

Aunque ahora estamos estudiando el abanico de masas que consideramos más probable si la materia oscura se compusiese de axiones, la naturaleza siempre puede sorprendernos. Buscar en un intervalo de masas algo inferior no es terriblemente difícil, pero las masas mayores sí constituyen un desafío. Sondearlas implica elevar la frecuencia de resonancia de la cavidad, lo que a su vez requiere reducir su diámetro. Sin embargo, ello nos deja con un volumen menor para buscar axiones. Podríamos incluir un gran número de cavidades dentro de un solo imán de gran tamaño para seguir disponiendo de un volumen considerable, pero lograrlo comienza a parecerse a un problema de «precisión suiza». También podríamos arreglárnoslas con una cavidad de poco tamaño, siempre que fuéramos capaces de compensarlo aumentando la intensidad del campo magnético. Algo así sería costoso, pero estamos investigándolo. Quizá dentro de cinco o diez años, un campo magnético de hasta 32 o incluso 40 teslas nos permitiría extender el intervalo de masas de nuestra búsqueda. Para masas del axión mucho más altas, próximas al meV, podríamos incluso detectar una señal proveniente del espacio. Si existen axiones con tales masas y forman halos de materia oscura alrededor de las galaxias, los radiotelescopios podrían observar líneas de emisión muy débiles.

Con el tiempo, el ADMX y otros proyectos serán capaces de explorar todas las masas que, según la teoría, pueden adoptar los axiones de la materia oscura. Que el intervalo plausible de masas sea accesible a los experimentos hace del axión un candidato atractivo para explicar esta enigmática sustancia, en comparación con algunas alternativas que quizá nunca podamos llegar a comprobar del todo.

Mientras prosigue nuestro trabajo experimental, los teóricos también hacen progresos en su afán por comprender la naturaleza de la materia oscura. Mediante complejos modelos cosmológicos ejecutados en superordenadores, tratan de obtener predicciones más fiables para la masa del axión. También es posible, por ejemplo, que los axiones se agrupen a lo largo del universo de una manera distinta a como lo harían las WIMP. Futuros experimentos astrofísicos, como el Gran Telescopio de Rastreos Sinópticos (LSST), que comenzará sus observaciones en 2019, podrían cartografiar la estructura a gran escala del cosmos con la precisión suficiente para distinguir entre los distintos candidatos a componer la materia oscura. Otra posibilidad es que los axiones predichos por la QCD sean solo un reflejo de alguna teoría física más general. Una de ellas, la teoría de cuerdas, predice axiones con masas mucho menores que las investigadas por el ADMX, si bien se trata de una propuesta altamente especulativa.

Hace veinte años existía un amplio consenso acerca de que la materia oscura estaba formada por WIMP. Desde entonces, el atractivo de los axiones ha aumentado. En un futuro no muy lejano, es probable que sepamos si constituyen o no la solución al misterio del lado invisible del cosmos. IyC

> **El ADMX ha alcanzado la sensibilidad suficiente para, o bien detectar los axiones, o bien descartar sus versiones más verosímiles en cinco o diez años**

PARA SABER MÁS

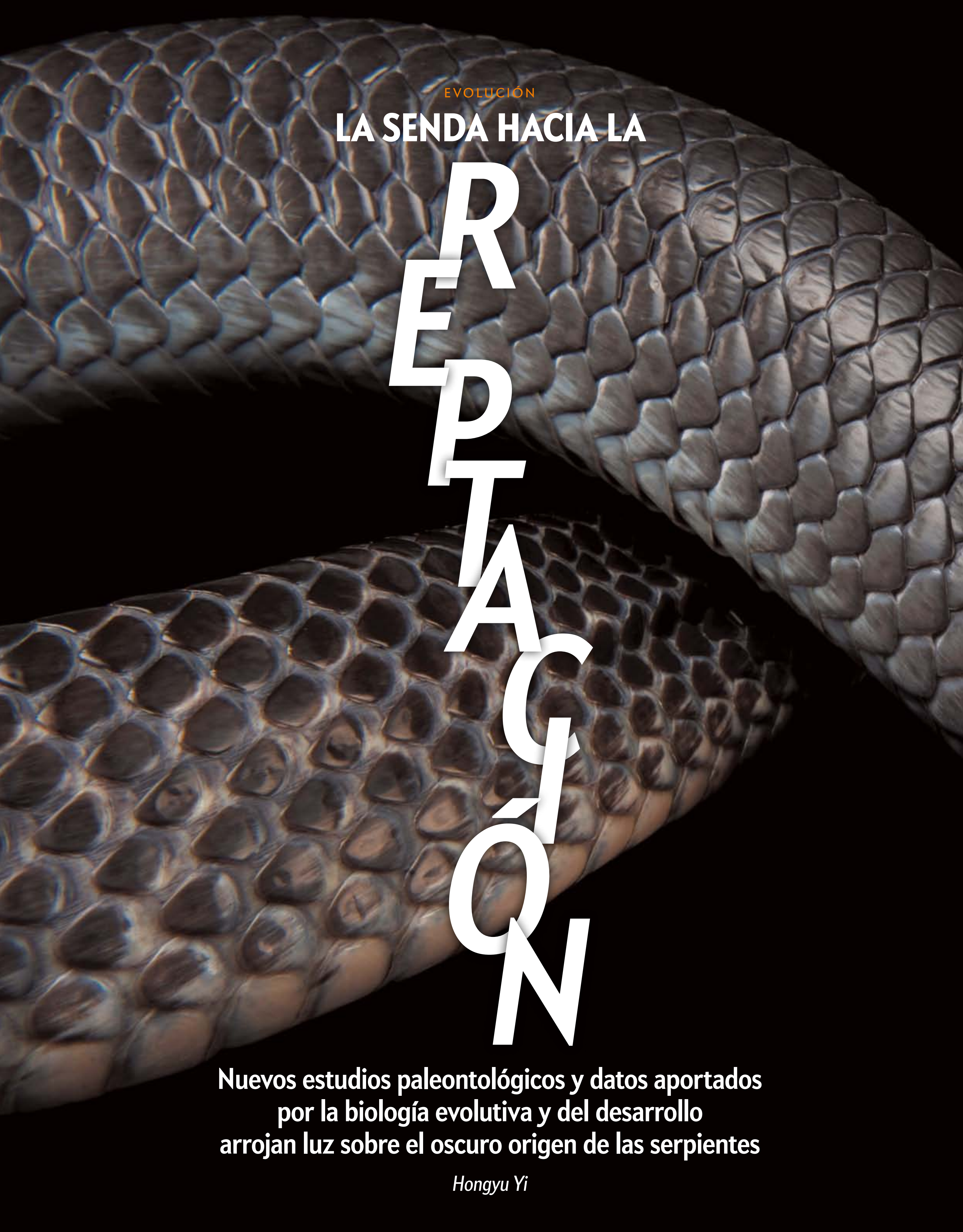
_CP_ conservation in the presence of pseudoparticles. Roberto Peccei y Helen Quinn en *Physical Review Letters*, vol. 38, n.º 25, págs. 1440-1443, junio de 1977.
A new light boson? Steven Weinberg en *Physical Review Letters*, vol. 40, n.º 4, págs. 223-226, enero de 1978.
Problem of strong _P_ and _T_ invariance in the presence of instantons. Frank Wilczek en *Physical Review Letters*, vol. 40, n.º 5, págs. 279-282, enero de 1978.
Axions, domain walls, and the early universe. Pierre Sikivie en *Physical Review Letters*, vol. 48, n.º 17, págs. 1156-1159, abril de 1982.

EN NUESTRO ARCHIVO

Tras el rastro de los axiones. Joerg Jaeckel, Axel Lindner y Andreas Ringwald en *IyC*, marzo de 2015.
La búsqueda de la teoría final. Corey S. Powell en *IyC*, noviembre de 2015.

EVOLUCIÓN

LA SENDA HACIA LA REPTACIÓN



Nuevos estudios paleontológicos y datos aportados por la biología evolutiva y del desarrollo arrojan luz sobre el oscuro origen de las serpientes

Hongyu Yi



La anatomía de los ofidios constituye una modificación radical del diseño general de los vertebrados. Los investigadores llevan tiempo preguntándose cómo adquirieron esos rasgos singulares.

El estudio de nuevos fósiles ha esclarecido el papel que el ambiente y el comportamiento han desempeñado en el modelado de la anatomía de estos reptiles.

Por su parte, la biología evolutiva y del desarrollo han revelado algunos de los mecanismos genéticos que se esconden tras la atrofia de las extremidades, entre otros aspectos de la evolución de las serpientes.

Un acertijo chino reta a adivinar qué es aquello que corre sin pies, nada sin aletas y planea sin alas. La respuesta no es otra que la serpiente. Hoy más de 3000 especies de ofidios presentan un cuerpo alargado, ápodo, capaz de desplazarse por tierra y por agua y de surcar el aire entre los árboles. Sin embargo, sus antepasados remotos poseían extremidades de formas variadas. Los científicos se preguntan: ¿cómo las perdieron?

Los apéndices especializados suelen estar vinculados con hábitats concretos. Los cetáceos adquirieron las aletas para impulsarse en el líquido elemento. Las aves desarrollaron gradualmente las alas en su empeño por dominar el aire. Hace décadas que los biólogos evolutivos ansían saber qué tipo de entornos contribuyeron a forjar la peculiar anatomía de los ofidios, una incógnita que ha demostrado ser de difícil resolución, en parte por la multitud de ambientes que hoy habitan y en parte por la escasez de ancestros remotos que aporta el registro fósil. El debate gira en torno a dos hipótesis opuestas. La primera de ellas sostiene que perdieron sus extremidades en tierra firme como adaptación a la vida subterránea; la segunda, que adquirieron sus rasgos distintivos en el mar. Ambos ambientes son propicios para un cuerpo alargado y liso.



Hongyu Yi es investigadora del Instituto de Paleontología de Vertebrados y Paleoantropología de la Academia China de las Ciencias, en Pekín. Estudia la evolución de los órganos sensoriales para desentrañar el modo en que la adaptación a ciertos ambientes ha modelado la anatomía reptiliana.

Si pudiéramos remontarnos hasta el Cretácico, hace entre 145 y 66 millones de años, momento en que surgen los primeros representantes de los ofidios, podríamos contemplar a las especies primitivas en su hábitat y comprobar si dominaban el medio hipogeo (subsuelo) o el acuático. Pero, claro está, como pista solo disponemos de sus restos fosilizados, por lo que no resulta nada fácil reconstruir la ecología y el comportamiento exclusivamente a partir del esqueleto, sobre todo si está dañado o incompleto, como acostumbra a suceder con los restos fósiles.

En el último decenio, empero, las novedosas técnicas de exploración por la imagen han permitido avanzar en el conocimiento sobre el origen de los ofidios. La tomografía de rayos X de alta resolución de cráneos fósiles ha revelado rasgos que aportan indicios sobre la ecología de las formas arcaicas. Al mismo tiempo, los estudios de biología del desarrollo han dilucidado los mecanismos genéticos que determinan la pérdida de las extremidades, así como la adquisición de nuevas vértebras.

Nuestros conocimientos distan de ser completos, pero tales pistas están permitiendo al fin encajar las primeras piezas del rompecabezas que supone la extraordinaria transformación evolutiva que desembocó en la reptación.

EXPERIMENTOS EVOLUTIVOS

Las serpientes no perdieron las extremidades de improviso. Según el registro paleontológico, la primera serpiente ápoda conocida, *Dinilysia patagonica*, surgió hace unos 85 millones de años durante el Cretácico superior, cuando los dinosaurios dominaban el planeta. Entre las areniscas de aspecto herrumbroso de la meseta patagónica se han recuperado especímenes de *Dinilysia* en un notable estado de conservación. Su esqueleto casi íntegro, tan largo como el de un humano adulto, revela que no solo carecía de extremidades, sino también de las cinturas escapular y pélvica que las sustentan. Puesto que los restos se hallaron en sedimentos terrestres, sabemos que habitó en tierra firme.

En cambio, otros ofidios contemporáneos conservaban las patas. *Najash rionegrina*, una especie de hábitos terrestres apenas más larga que un espagueti, habitaba en Argentina hace unos 92 millones de años y poseía un par de minúsculas patas traseras compuestas por elementos óseos que iban de la cadera al tobillo. Demasiado atrofiadas para soportar su peso, pudo valerse de ellas como apéndices de sujeción durante la cópula.

Otros ofidios del Cretácico superior provistos de patas poblaron los mares. Entre los fósiles procedentes de cuencas sedimentarias marinas cercanas a la actual Jerusalén figuran ejemplares que nadaron entre tiburones. Dos de esas especies, *Pachyrhachis* y *Haasiophis*, conservan casi enteras las extremidades posteriores, constituidas por el fémur, la tibia y los huesos del pie. Su función no está clara. Ambas carecían de cintura pélvica con que anclarlas al tronco corporal, por lo que no pudieron servir de gran cosa para el movimiento natatorio.

Dicho todo esto, tales fósiles indican que en el Cretácico superior la evolución de los ofidios ya se hallaba encarrilada. El cuerpo alargado y sinuoso con extremidades sumamente atrofiadas ya estaba consolidado y el grupo estaba experimentando una rápida diversificación en multitud de formas que debieron de colonizar nichos ecológicos muy variados. Para demostrar el origen de la anatomía característica de la serpiente es preciso, pues, hallar fósiles más antiguos aún.

Hasta no hace mucho, los paleontólogos disponían de pocos especímenes anteriores a ese período. Pero en el pasado lustro han salido a la luz varios candidatos del Cretácico inferior e incluso del Jurásico. Hallados en depósitos terrestres de Europa y EE.UU., están bastante incompletos y no revelan grandes detalles sobre las proporciones corporales. Pero si fueran realmente serpientes, extenderían el registro fósil del grupo otros 70 millones de años y demostrarían que los miembros más antiguos eran de pequeña talla y medraban en tierra firme, no en el mar.

Aun así, los crecientes indicios paleontológicos que apuntan al origen terrestre de las serpientes no abordan la cuestión de por qué adquirieron ese cuerpo liso y longilíneo. Vivir en el subsuelo favorecería la atrofia de las extremidades. Las serpientes y los lagartos minadores actuales simplemente empujan la cabeza a través del terreno blando para abrir las galerías, y cualquier apéndice les estorbaría. Pero afirmar que todos los ofidios fósiles compartieron ese mismo hábito resulta engañoso. Los fósiles del Jurásico y del Cretácico inferior están demasiado incompletos como para especular sobre su ecología. A juzgar por su corta cola, similar a la de las serpientes actuales que abren galerías, *Najash* pudo ser minadora. Por su parte, *Dinilysia*, la más antigua serpiente ápoda conocida, era mucho mayor que los reptiles minadores de hoy. ¿Pudo serlo? Me propuse descubrirlo.

EL OÍDO APORTA PISTAS

El día de Navidad de 2014 volé de Buenos Aires a Nueva York con una caja repleta de cráneos de *Dinilysia*. Junto con mis colegas argentinos habíamos tardado casi un año en tramitar el papeleo necesario para tomar prestados los especímenes con la intención de someterlos a exámenes por tomografía computerizada en EE.UU., todo con el propósito de estudiar el oído del ofidio.

¿Por qué el oído? En colaboración con Mark A. Norell, del Museo Norteamericano de Historia Natural, había desarrollado un método para diferenciar las serpientes minadoras modernas de las especies marinas basado en esa región anatómica, y deseábamos probarlo con *Dinilysia*.

Mediante una técnica puntera de exploración por imágenes, obtuvimos radiografías de alta resolución de los cráneos de docenas de serpientes y lagartos actuales. Después apilamos esas imágenes para crear modelos virtuales en tres dimensiones de su oído interno. Nos centramos en una estructura llamada vestíbulo, el cual contiene líquido linfático y los otolitos, que actúan como sensores de la gravedad y del movimiento.

Los análisis estadísticos de la morfología de los modelos revelaron diferencias notables entre el vestíbulo de las formas hipogeas, las terrestres generalistas y las acuáticas. En las serpientes marinas y los lagartos, el vestíbulo se ha atrofiado hasta casi desaparecer. En cambio, en las especies subterráneas se ha inflado como un globo, lo cual mejora la capacidad auditiva bajo tierra. Esta tendencia es válida sea cual sea la talla corporal y la anatomía de las extremidades del minador: la expansión del vestíbulo se observa tanto en una boa arenícola (Ericinos), de un metro de longitud, como en una serpiente tubular asiática (Cilindrofinos) de 25 centímetros, como en la extraña culebrilla ciega *Bipes* (Anfisbénidos), que conserva las extremidades anteriores pero no las posteriores.

PÁGINAS ANTERIORES: JOEL SARTORE, GETTY IMAGES

Tuve razones para sospechar que *Dinilysia* se alinearía con las minadoras: un estudio publicado en 2012 dio a conocer una radiografía de su cráneo donde se veía un vestíbulo voluminoso. Pero nadie sabía qué aspecto tendría el vestíbulo en tres dimensiones. Confiaba en que si sometía el fósil a nuestro método averiguaríamos el modo de locomoción de esta serpiente.

Nuestro estudio confirmó que su vestíbulo era, en efecto, grande, pues compartía la misma forma globosa que las minadoras de hoy día. De hecho, resultaba casi idéntico al de la moderna serpiente arcoíris (*Xenopeltis*), una excavadora de gran talla del sudeste asiático. Nuestro modelo predijo con una probabilidad cercana al 95 por ciento que *Dinilysia* era una minadora. Supusimos que sus hábitos debieron parecerse mucho a los de *Xenopeltis*: cazaría a ras de suelo y se abriría paso bajo el terreno blando en busca de cobijo.

Ubicados en el árbol evolutivo, estos hallazgos aclaran el papel que desempeñó el cambio de hábitat en la transición del lagarto a la serpiente. *Dinilysia* no fue uno de los primeros linajes en escindirse de los lagartos, sino que mantenía un estrecho parentesco con el ancestro de las serpientes actuales, más avanzado que *Najash*. La constatación de que *Dinilysia* era una minadora refuerza la hipótesis de que los linajes que entroncan con los ofidios actuales perdieron las patas como adaptación a la vida hipogea.

El hecho de que el minado, y no la natación, se convirtiera en el *modus operandi* predominante de los antepasados de las serpientes actuales no excluye que en el Cretácico un grupo de lagartos pudiera haber apostado por vivir bajo tierra y perdiese sus extremidades hasta acabar transformados en serpientes. La evolución opera con grandes dosis de azar. La adopción de la vida hipogea fue uno de los muchos sucesos trascendentales que tuvieron lugar durante los millones de años en que la anatomía de las serpientes cobró forma. Ese nuevo modo de vida tal vez acabó con algunas restricciones presentes en el genoma de los ofidios primitivos que hasta entonces habían sido esenciales para su supervivencia. Desembarazadas de ellas, las extremidades y el tronco pudieron mutar. De ahí que el registro fósil de las serpientes contenga una amplia variedad de tipos de extremidades y tallas corporales.

EL ALARGAMIENTO DEL CUERPO

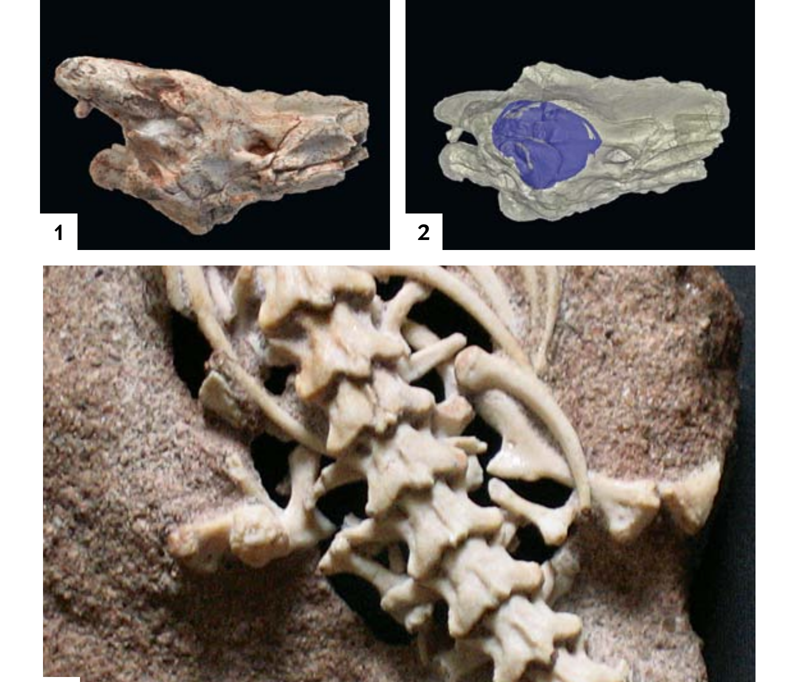
La secuenciación hologenómica y la edición de genes de especies actuales con fines experimentales han mejorado el conocimiento sobre la evolución de los ofidios. Todos los vertebrados compartimos numerosos genes. Las enormes diferencias anatómicas entre grupos tan dispares como las aves y los peces son fruto de mutaciones en una pequeña parte del genoma. En teoría, los pasos que separan el cuerpo ápodo y longilíneo de la serpiente del compacto y aplomado lagarto podrían ser el resultado de cambios en tan solo un puñado de regiones clave del genoma.

Una mirada atenta al desarrollo embrionario de los vertebrados aporta pistas sobre las etapas necesarias para adquirir uno de los rasgos distintivos de la serpiente: su larga columna vertebral, constituida hasta por más de 300 vértebras, en comparación con las 33 de la especie humana o las 65 de un lagarto corriente. La cabeza y el tronco de los vertebrados dotados de extremidades se forman a partir de conjuntos de células denominados somitos. Cada somito engendra una vértebra. De partida, los somitos parecen similares, pero después se diferencian para crear los segmentos cervical, dorsal, lumbar, sacro y caudal (coccígeo) de la columna vertebral.

Un gen caprichosamente bautizado como *Lunatic Fringe* («elemento radical») ayuda a aumentar el número de vértebras de las serpientes. Actúa con otros genes denominados somitogénicos, encargados de crear agrupaciones de células en el polo caudal del embrión. Una vez acumulado cierto número de células, se forma un somito que se desplaza hacia delante por el cuerpo, como una cuenta sobre un cordel. Juntos, los genes somitogénicos conforman el reloj de la somitogénesis, así llamado porque se activan y se desactivan en intervalos regulares para crear los somitos. Cuanto más aprisa corre el reloj, más somitos surgen a partir del mismo número de células. Céline Gómez, ahora en el Instituto Sanger de Cambridge, y sus colaboradores demostraron que *Lunatic Fringe* se expresa con mayor frecuencia en la culebra de maizal (*Pantherophis guttatus*), cuyo reloj somitogénico es mucho más veloz que el de los lagartos.

Las vértebras no son los únicos elementos óseos que parecen haberse desbocado en las serpientes. Las costillas las secundan. Pensemos en el ratón y el caimán. En ambos solo las vértebras dorsales sostienen las costillas; las cervicales (cuello) y las lumbares (cadera) carecen de ellas porque el gen *Hox10* suprime su formación en esos segmentos vertebrales. En las serpientes, en cambio, todas las vértebras, salvo las tres primeras de la cabeza y las que integran la cola, se articulan con costillas.

Se ha supuesto desde hace tiempo que el ratón y el caimán constituyen buenos modelos del esqueleto axial de los animales primitivos con extremidades, pues sus vértebras cervicales

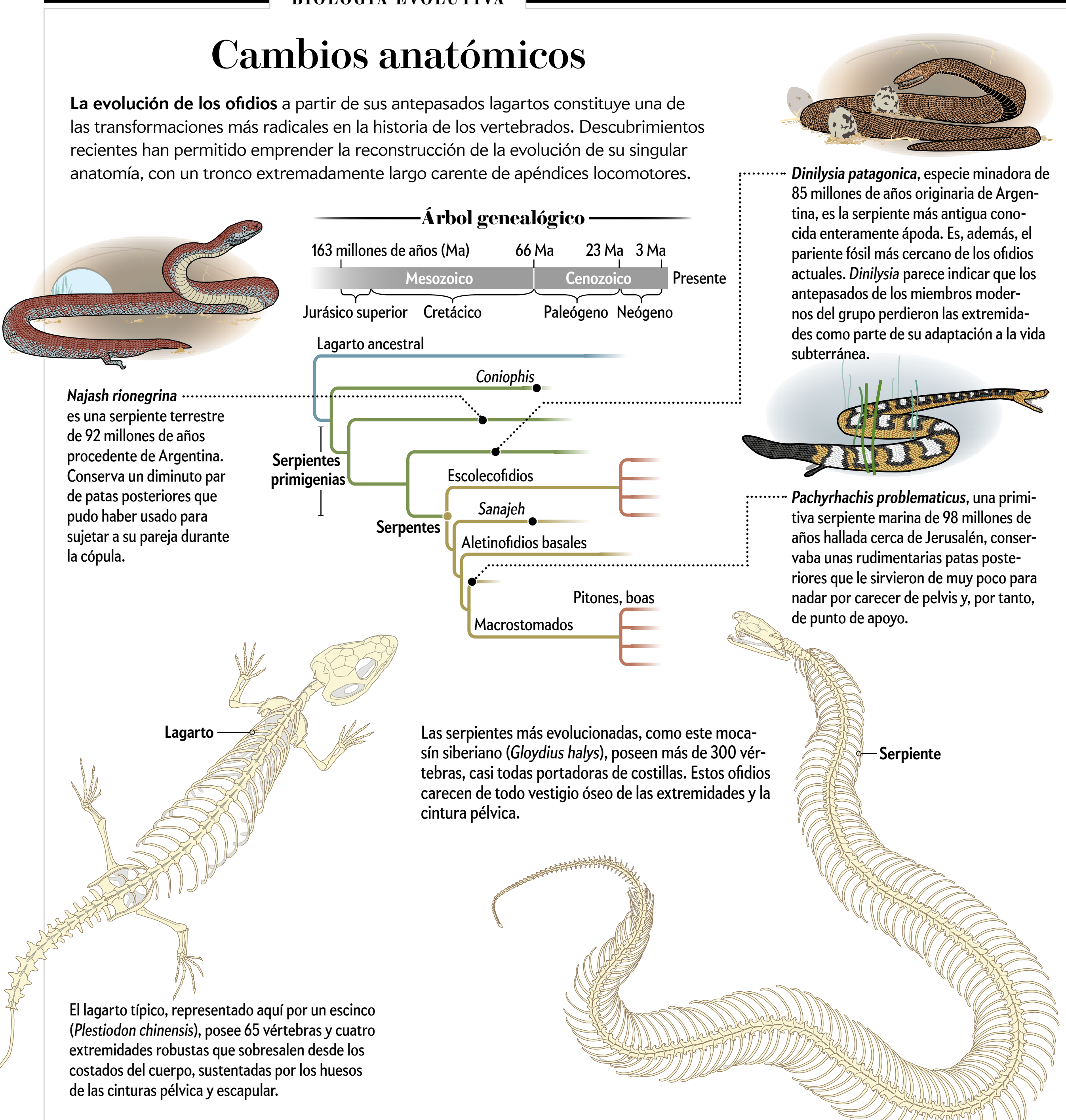


EL CRÁNEO DE *DINILYSIA* (*1*), la serpiente ápoda más antigua conocida, alberga en el oído interno un vestíbulo agrandado, tal y como revelan las radiografías de alta resolución (*2*). Ese rasgo es común en los ofidios de hábitos minadores. Otras serpientes de antigüedad similar, como *Najash*, poseían extremidades posteriores rudimentarias (*3*).

DE «THE BURROWING ORIGIN OF MODERN SNAKES», POR HONGYU YI Y MARK A. NORELL EN *SCIENCE ADVANCES*, VOL. 1, N.º 10, ART. N.º E1500743; 27 DE NOVIEMBRE DE 2015 (*1, 2*); CORTESÍA DE PALEONINJA WIKIPEDIA (*3*)

Cambios anatómicos

La evolución de los ofidios a partir de sus antepasados lagartos constituye una de las transformaciones más radicales en la historia de los vertebrados. Descubrimientos recientes han permitido emprender la reconstrucción de la evolución de su singular anatomía, con un tronco extremadamente largo carente de apéndices locomotores.



Najash rionegrina es una serpiente terrestre de 92 millones de años procedente de Argentina. Conserva un diminuto par de patas posteriores que pudo haber usado para sujetar a su pareja durante la cópula.

Dinilysia patagonica, especie minadora de 85 millones de años originaria de Argentina, es la serpiente más antigua conocida enteramente ápoda. Es, además, el pariente fósil más cercano de los ofidios actuales. *Dinilysia* parece indicar que los antepasados de los miembros modernos del grupo perdieron las extremidades como parte de su adaptación a la vida subterránea.

Pachyrhachis problematicus, una primitiva serpiente marina de 98 millones de años hallada cerca de Jerusalén, conservaba unas rudimentarias patas posteriores que le sirvieron de muy poco para nadar por carecer de pelvis y, por tanto, de punto de apoyo.

Las serpientes más evolucionadas, como este mocasín siberiano (*Gloydius halys*), poseen más de 300 vértebras, casi todas portadoras de costillas. Estos ofidios carecen de todo vestigio óseo de las extremidades y la cintura pélvica.

El lagarto típico, representado aquí por un escinco (*Plestiodon chinensis*), posee 65 vértebras y cuatro extremidades robustas que sobresalen desde los costados del cuerpo, sustentadas por los huesos de las cinturas pélvica y escapular.

PORTIA SLOAN ROLLINGS

y lumbares son claramente distintas de las torácicas. La idea arraigada es que las serpientes desarrollaron su columna vertebral a partir de esa forma arcaica, una especialización que se asociaría a la pérdida de las extremidades. Se sospechaba que los genes *Hox* que controlan la diferenciación de las vértebras en otros animales se habrían visto alterados de algún modo en las serpientes.

Un reciente análisis paleontológico señala en una dirección distinta. En 2015, Jason J. Head, entonces en la Universidad de Nebraska en Lincoln, y P. David Polly, de la Universidad de Indiana en Bloomington, modelizaron la evolución del esqueleto del tronco en los tetrápodos. En primer lugar, predijeron estadísticamente que las serpientes poseen los mismos segmentos de la columna vertebral que los lagartos. Los genes *Hox* de la serpiente podrían simplemente estar dirigiendo cambios más sutiles en la morfología de los diferentes tipos de vértebras. En segundo lugar, constataron que, en contra de la creencia general, en los tetrápodos primitivos la mayoría de las vértebras situadas por delante de la cadera estaban unidas a costillas. Los fósiles de los antepasados de los mamíferos y de los caimanes lucen costillas soldadas a las vértebras del cuello y de la cintura. Por tanto, la ausencia o la reducción de las costillas en tales regiones en los

caimanes, las aves y los mamíferos modernos surgieron de forma independiente y proceden de su remoto antepasado común.

En suma, la observación conjunta de las especies fósiles y vivientes ha revelado qué carácter del esqueleto del tronco heredaron las serpientes de sus ancestros con patas (la disposición de la parrilla costal) y cuál es genuinamente suyo (el extraordinario alargamiento del cuerpo).

DESPOJADO DE LAS EXTREMIDADES

Hace poco, los investigadores han hecho nuevas incursiones en los mecanismos genéticos responsables de la atrofia de los apéndices locomotores. En 2016, Evgeny Z. Kvon, del Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley, y sus colaboradores anunciaron el descubrimiento de un interruptor genético involucrado en el desarrollo de dichos apéndices en la serpiente y el ratón. En su estudio, insertaron un segmento del gen del ofidio en el genoma de un ratón de laboratorio. El resultado del experimento fue un animal fantástico: un ratón «serpentino», provisto de un cuerpo normal de roedor pero con las extremidades truncadas.

El gen de serpiente insertado en el ratón contiene un segmento de ADN denominado secuencia reguladora ZRS. Esta resulta crítica para que las patas traseras del roedor se formen con normalidad, y basta una mutación en ella para provocar anomalías en las patas. Como es tan importante para la supervivencia, ha permanecido casi inalterada durante la evolución de los tetrápodos, pero es muy variable en los ofidios.

Las variantes halladas en estos reptiles concuerdan con su diversidad morfológica en el desarrollo de las extremidades. Las serpientes actuales más primitivas, como las pitones y las boas, conservan una secuencia ZRS que promueve la formación de las patas, si bien es más corta que la de otros tetrápodos. En consecuencia, ambos tipos de ofidios presentan miembros posteriores degenerados, que semejan espolones. En cambio, las serpientes más modernas, como la culebra de maizal, han perdido todo el segmento ZRS y no conservan ningún vestigio de ellos.

El hallazgo de las variantes genéticas que concuerdan con diferencias en el desarrollo de las patas aporta nueva información sobre las serpientes fósiles. *Najash* conserva la cintura pélvica, el fémur, así como la tibia y la fíbula truncadas, pero no los huesos pedios. *Pachyrhachis* también carece de estos últimos. Ambas indican que en la transición del lagarto a la serpiente, los genes reguladores propios de los apéndices locomotores habían sido modificados, pero aún seguían siendo funcionales en varias serpientes primitivas. Por su parte, *Dinilysia* carecía totalmente de huesos apendiculares y de cintura pélvica, lo cual supone la primera pérdida absoluta de función en la evolución de la secuencia promotora de las extremidades propia de los ofidios.

En el último capítulo de la era de los dinosaurios, el Cretácico superior, las serpientes experimentaron una transformación radical en su anatomía y quizás una evolución acelerada del genoma. Solo hemos comenzado a indagar en la base genética de los rasgos que nos brinda el registro fósil. *Haasiophis* no conservaba la cintura pélvica, pero sí un fémur íntegro y una tibia y un peroné bien desarrollados, junto con el astrágalo y los huesos pedios. Ninguna serpiente actual muestra esa misma disposición, pero su existencia en el registro fósil sugiere la interacción en el pasado remoto de varias secuencias reguladoras de las extremidades similares a la ZRS.

ESLABONES PERDIDOS

No cesan de aflorar nuevos indicios sobre los orígenes de las serpientes. En 2015, un equipo dirigido por David M. Martill, de la Universidad de Portsmouth, anunció el descubrimiento en Brasil de una serpiente de 120 millones de años. *Tetrapodophis ampectus* conserva íntegras las cuatro patas, con todos los dedos y la robustez suficiente como para actuar de apéndices de sujeción durante la cópula. Y pese a que era más corta que un palillo chino, estaba articulada por más de 200 vértebras. El largo tronco y la corta cola indican que debió de ser minadora, otro tanto en favor del hipotético origen terrestre del grupo. A la vista de su antigüedad, del entorno donde vivió y del estado de sus extremidades, *Tetrapodophis* parece reunir todos los atributos que los paleontólogos han estado persiguiendo en su búsqueda de especies de transición.

Pero en un encuentro de la Sociedad de Paleontología de los Vertebrados celebrado en Salt Lake City, Utah, en 2016, algunos asistentes pusieron en duda la descripción del fósil hecha por los descubridores. Estos críticos insinuaron que *Tetrapodophis* no sería una serpiente, sino un lagarto marino. El espécimen puede reavivar el debate sobre si las serpientes surgieron en tierra firme o en el mar. Sin embargo, en ese mismo encuentro, un grupo de científicos informó de que el propietario privado de *Tetrapodophis* lo había retirado del museo público que acogía los fósiles, vulnerando la convención de que todas las especies nombradas, fósiles o vivientes, deben permanecer a disposición de otros investigadores y del público para su estudio. El debate sobre *Tetrapodophis* ha quedado en el aire a raíz de ello.

Dejando a un lado a *Tetrapodophis*, los especialistas están investigando incógnitas sobre la evolución de las serpientes. Todos estamos ansiosos por averiguar, por ejemplo, si aparecieron primero en los continentes boreales o en los australes y si las representantes primigenias del grupo tenían hábitos nocturnos o diurnos. Queremos saber cómo adquirieron esas mandíbulas lo bastante grandes como para engullir presas mayores que su cabeza y cómo se volvieron venenosas.

Las respuestas a esas incógnitas mejorarán un relato ya de por sí fascinante. El folclore y la religión contienen todo tipo de historias que pretenden explicar la pérdida o la transformación de ciertas partes del cuerpo. El relato bíblico sobre la serpiente sostiene que Dios la condenó a arrastrarse sobre su vientre por persuadir a Adán y Eva para que mordieran la manzana del Paraíso. En la mitología china, el celestial Emperador de Jade la castigó por morder a la gente y ordenó que le cortaran las patas y se las dieran a la rana. Pero, tal y como subrayan las pruebas fósiles y genéticas de los ofidios, la selección natural no responde a objetivos. Las innovaciones evolutivas no son el fruto de una concepción deliberada: son consecuencia de las innumerables interacciones entre los animales y su entorno.

PARA SABER MÁS

Evolution of the snake body form reveals homoplasy in amniote *Hox* gene function. Jason J. Head y P. David Polly en *Nature*, vol. 520, págs. 86-89, 2 de abril de 2015.

A four-legged snake from the Early Cretaceous of Gondwana. David M. Martill et al. en *Science*, vol. 349, págs. 416-419, 24 de julio de 2015.

The burrowing origin of modern snakes. Hongyu Yi y Mark A. Norell en *Science Advances*, vol. 1, n.º 10, art. e1500743, 27 de noviembre de 2015.

Progressive loss of function in a limb enhancer during snake evolution. Evgeny Z. Kvon et al. en *Cell*, vol. 167, n.º 3, págs. 633-642, 20 de octubre de 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

Lepidosaurios en movimiento: de los lagartos a las serpientes. Sebastián Apesteguía en *IyC*, agosto de 2007.

Biomecánica del serpenteo. Daniel I. Goldman y David L. Hu en *IyC*, febrero de 2011.



AGRICULTURA



LA REVOLUCIÓN DEL FITOBIOMA

La explotación de la compleja red que enlaza los cultivos con los microorganismos, el suelo, la fauna y otros factores ambientales promete mejorar las cosechas

Marla Broadfoot

Ilustraciones de Cherie Sinnen

Marla Broadfoot, periodista científica, es colaboradora de *American Scientist*. Tiene un doctorado en genética y biología molecular.



Mercedes Díaz camina pesadamente por un campo de soja embarrado al tiempo que con la yema de sus dedos acaricia la punta de docenas de plantas que se alzan hasta la rodilla. Mientras inspecciona los tallos, las hojas y las vainas de semillas, musita una lista de enfermedades: barrenador de la vaina, mancha ojo de rana, podredumbre blanca. De pronto, vislumbra una maraña de hojas moteadas y exclama «¡SMS!», siglas del síndrome de muerte súbita. Arranca una y me la pasa. Doy vuelta a la hoja, arrugada y del tamaño de la palma de mi mano. Multitud de orificios irregulares horadan la superficie, acompañados de feas manchas de tono pardusco amarillento: son los efectos de una toxina segregada por un hongo que invade la planta, devora el follaje desde el interior y consume las vainas. El SMS es una de las mayores plagas que azota Estados Unidos. Según la Unión de Productores de Soja (USB), costó a sus agricultores más de un millón y medio de toneladas de producción en 2014. Y pese a todo, Díaz no podía estar más gozosa al verla en su campo.

Esta fitopatóloga es una de los muchos investigadores que buscan nuevas formas de proteger los cultivos contra las amenazas con el fin de aumentar drásticamente el rendimiento. En 2016, su equipo recubrió semillas con miles de microbios distintos y las sembró, junto a parcelas de control plantadas con semillas sin tratar, en medio millón de puntos repartidos por todo el medio oeste y el sur de Estados Unidos. A lo largo del perímetro de estos campos, los investigadores dispusieron parcelas centinelas, sembradas con variedades sensibles a enfermedades que actúan como el proverbial canario en las minas de carbón, advirtiendo del daño que podrían padecer el resto de los cultivos. Cuando Díaz encuentra SMS o alguna otra plaga en las parcelas centinela pero no en las parcelas experimentales, podría ser una señal de que los microbios están actuando y ayudando a producir cultivos más sanos y productivos.

Sin embargo, en aquel lluvioso día de septiembre, Díaz descubrió que tanto las parcelas experimentales como las de control habían escapado al destino de las centinelas. Los microbios no marcaron la diferencia, ¿o quizá sí? Incluso una mejora productiva de 400 kg por hectárea (sobre un promedio ligeramente superior a los 3300 kg por hectárea de soja) es casi imposible de apreciar a simple vista. Tendría que esperar a que se cosecharan las plantas y a analizar los datos para saber si alguno de los microbios sirvió a los fines esperados.

La investigación agronómica suele ser un proceso lento, impredecible, pero los expertos como Díaz creen que es una carrera contrarreloj. Si la agricultura no cambia radicalmente durante las décadas venideras, es posible que no haya suficiente comida para toda la humanidad. Se calcula que la población mundial pasará de 7500 a 9700 millones de habitantes en 2050. Para alimentar todas esas nuevas bocas y satisfacer la creciente demanda de carne, será preciso que los agricultores aumenten en un 70 por ciento la producción, según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Se trata de un gran reto que se hace aún mayor por una serie de tendencias preocupantes. La superficie de tierra cultivable está disminuyendo por culpa de la urbanización y del cambio climático, entre otros factores. Los incrementos anuales en el rendimiento de las cosechas básicas se han estancado. El uso de abonos ha alcanzado un punto de inflexión en el que verter más productos químicos en los campos probablemente hará más daño que bien. Ni siquiera los cultivos genéticamente modificados han cumplido las expectativas de aumentar la producción de alimentos.

«Tenemos que dejar de buscar soluciones milagrosas», advierte Jan Leach, fitopatólogo de la Universidad Estatal de Colorado. «Este no es un problema que pueda resolver ninguno de nosotros por su cuenta; requerirá equipos multidisciplina-

EN SÍNTESIS

Con el fin de satisfacer la demanda mundial de alimentos se están investigando nuevas formas de explotar el fitobioma, la compleja red que enlaza los cultivos con las comunidades microbianas, el suelo, el tiempo, la fauna y demás factores ambientales.

Entre las innovaciones más prometedoras destacan las semillas recubiertas con hongos o bacterias que frenan las plagas o promueven el crecimiento. Los primeros productos de este tipo ya están en el mercado.

Es probable que las intervenciones sobre el fitobioma susciten menos controversia que las semillas genéticamente modificadas, pero plantean algunos riesgos. En cualquier caso, la biotecnología por sí sola no podrá acabar con el hambre en el mundo.

res cuyos integrantes tendrán que cooperar como nunca se ha visto.» Leach y otros defienden un enfoque integral, que contemple la interacción de todos los componentes del campo de cultivo (las plantas, el suelo, los microbios, los insectos y el clima, conocidos colectivamente como el fitobioma) para determinar el rendimiento de las cosechas. El concepto se remonta a los naturalistas del siglo xix Alfred Russel Wallace y Charles Darwin, quienes presentaron la naturaleza como una red vasta y entrelazada en que las especies vivientes se hallan inmersas en una perpetua adaptación al entorno cambiante en el que viven.

Reparemos en la soja tan apreciada por Díaz. Cuando un insecto se posa sobre una hoja, la planta responde secretando sustancias volátiles a través de sus raíces, lo que, a su vez, altera la composición microbiana del suelo. Estos microbios pueden entonces activar una serie de genes en las plantas circundantes, que las pone en guardia ante un posible ataque. Este mecanismo de defensa vegetal básico es sensible a factores ambientales y puede ser vulnerable al cambio climático. Además, los patógenos poseen sus propios trucos. Algunos pueden dispararse a sí mismos desde la superficie de las hojas como una bala de cañón y, aprovechando las corrientes de aire, desplazarse de campo a campo, de continente a continente. En las nubes, algunas cepas de microbios voladores de gran altura pueden incluso influir en el tiempo y propiciar la lluvia y el granizo que los devuelvan a la tierra [*véase* «Microbios patógenos de altos vuelos», por D. Schmale y S. Ross; Investigación y Ciencia, abril de 2017].

Durante siglos los científicos han sospechado esta complejidad, pero solo recientemente los avances técnicos han permitido desvelar esas intrincadas interacciones con la esperanza de hallar soluciones para la agricultura más fiables y sostenibles. Gracias a la secuenciación genómica, ahora es posible recontar todos los microbios del suelo, hasta las variedades raras o las cepas de cultivo difícil, imposibles de multiplicar en el laboratorio. También es posible conocer cómo cambian estas comunidades microbianas en el espacio y en el tiempo, tal vez como resultado de un aumento brusco de la cantidad de abono o de un desplome de la temperatura. Se pueden «grabar» las conversaciones que los microbios, las plantas y otros organismos mantienen entre sí y tratar de descifrar cómo esa comunicación química impulsa la productividad y el vigor de los cultivos.

Llegará un día en que el agricultor podrá recorrer el campo con un tractor especialmente equipado y hacer un censo completo de sus residentes microbianos, junto con los parámetros habituales de la «agricultura de precisión», como el grado de humedad del suelo y el contenido en nutrientes. Esos datos podrán combinarse con los rendimientos de las cosechas anteriores, las plagas y los patógenos potenciales y las previsiones meteorológicas para predecir qué combinación de semillas, nutrientes, agroquímicos y microbios redundaría en un rendimiento máximo.

El movimiento para hacer realidad esa ilusión apenas ha comenzado. En 2016, un equipo diverso de científicos trazó un ambicioso plan para transformar el futuro de la agricultura: «Fitobiomas: Hoja de ruta para la investigación y la aplicación práctica». A raíz de la hoja se fundó la revista *Phytobiomes*, una publicación académica, y Phytobiomes Alliance, una colaboración entre el sector agroindustrial y la universidad que engloba más de una docena de entidades, algunas completamente nuevas, como BioConsortia e Indigo, y otros nombres familiares, como Monsanto, para la que trabaja Díaz. Durante los dos últimos años, estas empresas han hecho grandes inversiones para acelerar la investigación y el desarrollo, compitiendo por su cuota en el mercado mundial de los productos biológicos destinados a la agricultura, que se calcula que en 2020 alcanzará los 10.000 millones de dólares. Consideran que el suelo bajo nuestros pies —y la vasta red de microorganismos que reside en su seno— es vital para ese esfuerzo. Las bacterias y los hongos edáficos facilitan el crecimiento de las plantas, las ayudan a soportar el estrés, a reforzar la respuesta inmunitaria y a mantener a raya plagas y enfermedades. Los agricultores han sabido algo de todo esto desde finales del siglo xix, cuando comenzaron a tratar sus campos de guisantes y judías con el rizobio, una bacteria que incorpora nitrógeno al suelo. Hoy hay en el mercado docenas de productos basados en el microbioma edáfico, con más en camino. Monsanto, en colaboración con Novozymes, con sede en Dinamarca, está apostando por las semillas bañadas en microbios, desarrolladas en los experimentos masivos en los que participa Díaz. Otros han tomado vías diferentes, como la modificación del genoma de los cultivos para que atraigan a microbios beneficiosos, o la modulación de la comunicación entre las plagas y los vegetales para que estos puedan detectar mejor las amenazas y responder a ellas. Dada la complejidad del fitobioma, las posibles vías de influencia son infinitas. Pero también lo son los callejones sin salida. El desafío reside en hallar el cuerno de la abundancia a tiempo para evitar la hambruna.

El crecimiento de la población mundial, que se prevé que pase de 7500 a 9700 millones de habitantes en 2050, exigirá aumentar un 70 por ciento la producción de alimentos

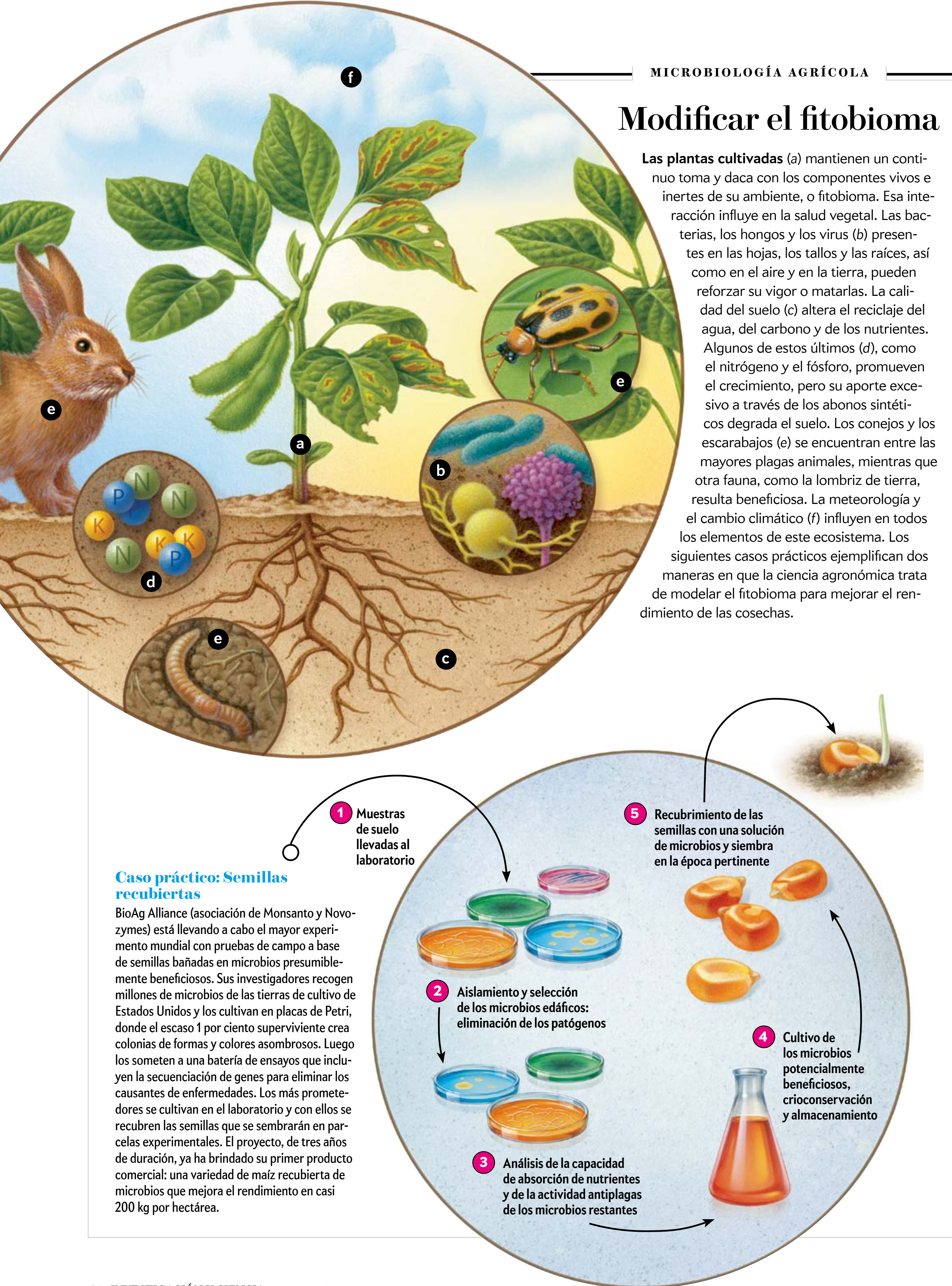
NOTAS DESDE LO MÁS PROFUNDO

A una hora de San Luis, los maizales lucen pálidos bañados por el sol de mediados de septiembre. Las plantaciones de soja recuerdan a las alfombras de flecos largos, tan de moda en los años setenta, teñidas en tonos de verde oliva y oro viejo. Me dirijo con Díaz y sus colegas a un lugar no indicado, en las afueras de Stonington (Illinois). Al pisar un charco, agarro fuerte mi copia del mapa del campo que muestra dónde se sembraron miles de semillas recubiertas de microbios. Estos se multiplicaron en recipientes llenos de un nutritivo caldo de cultivo; luego, en depósitos enormes de acero inoxidable, se procedió a recubrir con ellos las semillas, que permanecieron congeladas hasta la siembra. Cuando estas brotan, los microbios cobran vida, pero lo que sucede a continuación depende de los múltiples factores que componen el fitobioma.

Me adentro en un laberinto de plantas de maíz detrás de Díaz, que me enseña varias mazorcas centinelas cubiertas de moho rosa, plagadas de minúsculas mosquitas blancas. Los vegetales carecen de un auténtico sistema inmunitario, pero han desarrollado una serie de estratagemas contra los insectos dañinos. Algunas engrosan las paredes de sus células para que los intrusos no puedan perforarlas o concentran sustancias tóxicas en las raíces o en el follaje con fines disuasorios. La nicotina,

Modificar el fitobioma

Las plantas cultivadas (*a*) mantienen un continuo toma y daca con los componentes vivos e inertes de su ambiente, o fitobioma. Esa interacción influye en la salud vegetal. Las bacterias, los hongos y los virus (*b*) presentes en las hojas, los tallos y las raíces, así como en el aire y en la tierra, pueden reforzar su vigor o matarlas. La calidad del suelo (*c*) altera el reciclaje del agua, del carbono y de los nutrientes. Algunos de estos últimos (*d*), como el nitrógeno y el fósforo, promueven el crecimiento, pero su aporte excesivo a través de los abonos sintéticos degrada el suelo. Los conejos y los escarabajos (*e*) se encuentran entre las mayores plagas animales, mientras que otra fauna, como la lombriz de tierra, resulta beneficiosa. La meteorología y el cambio climático (*f*) influyen en todos los elementos de este ecosistema. Los siguientes casos prácticos ejemplifican dos maneras en que la ciencia agronómica trata de modelar el fitobioma para mejorar el rendimiento de las cosechas.



Caso práctico: Semillas recubiertas

BioAg Alliance (asociación de Monsanto y Novozymes) está llevando a cabo el mayor experimento mundial con pruebas de campo a base de semillas bañadas en microbios presumiblemente beneficiosos. Sus investigadores recogen millones de microbios de las tierras de cultivo de Estados Unidos y los cultivan en placas de Petri, donde el escaso 1 por ciento superviviente crea colonias de formas y colores asombrosos. Luego los someten a una batería de ensayos que incluyen la secuenciación de genes para eliminar los causantes de enfermedades. Los más prometedores se cultivan en el laboratorio y con ellos se recubren las semillas que se sembrarán en parcelas experimentales. El proyecto, de tres años de duración, ya ha brindado su primer producto comercial: una variedad de maíz recubierta de microbios que mejora el rendimiento en casi 200 kg por hectárea.

Caso práctico: Interacción microbio/fitófago/planta

Las plantas carecen de un verdadero sistema inmunitario, pero detectan y responden a los ataques de insectos y bacterias. El ataque de insectos fitófagos hace que segreguen compuestos que interfieren con la digestión y el crecimiento de los intrusos (*situación 1*). Un ataque bacteriano provoca la liberación de compuestos antimicrobianos. Algunos insectos, como las larvas del escarabajo de la patata, engañan a la planta atacada regurgitando sus bacterias intestinales sobre las hojas, lo que confunde a esta sobre la naturaleza de la amenaza y deja indemnes a los insectos (*situación 2*). Nuevos estudios buscan maneras de desbaratar el engaño.

Leptinotarsa decemlineata
(adulto)

SITUACIÓN 1
Desencadenante: destrucción mecánica por un insecto fitófago

1 Larva devorando una hoja

2 La planta segrega sustancias específicas contra los fitófagos

3 Los compuestos defensivos dificultan el crecimiento de nuevos fitófagos

SITUACIÓN 2
Desencadenante: las bacterias intestinales del insecto enmascaran el daño en las hojas

1 La larva devora una hoja y a la vez vierte bacterias sobre la superficie foliar

2 La planta libera compuestos antibacterianos y deja en suspenso las defensas contra los fitófagos

3 Larva sana

Compuestos específicos contra los fitófagos

Bacterias intestinales

la cafeína e incluso los taninos que confieren al vino tinto su astringencia son productos de defensa vegetales.

Siglos de selección y décadas de ingeniería genética han tratado de reforzar las defensas de las plantas y dotarlas de otros caracteres que mejoren el rendimiento de las cosechas. Así, por ejemplo, más de la mitad del maíz que se cultiva en Estados Unidos contiene el gen de una bacteria con propiedades insecticidas llamada *Bacillus thuringiensis*, que convierte la planta en mortal para las larvas de escarabajo. Ahora se buscan otras características vinculadas con el fitobioma que promuevan el vigor vegetal. Se ha descubierto que las plantas destinan hasta el 30 por ciento de su energía a atraer a los microbios beneficiosos y repeler a aquellos que no les convienen. Jeffery Dangl, biólogo vegetal de la Universidad de Carolina del Norte en Chapel Hill, investiga cómo alterar el genoma vegetal para facilitar el crecimiento de los microorganismos de su entorno. Recientemente ha descubierto un gen que modela las comunidades bacterianas de las raíces y del suelo circundante (la rizosfera) para que absorban del suelo más fosfato, un nutriente cuyo suministro va a la baja.

Otra gran línea de investigación sobre el fitobioma se centra en la resistencia a los insectos fitófagos. Por lo general, las plantas detectan algunas plagas gracias a la presencia en la saliva del insecto de unos compuestos químicos llamados elicitores. Gary Felton, entomólogo de la Universidad Estatal de Pensilvania, y sus colegas descubrieron que algunos escarabajos y orugas enmascaran esas moléculas delatoras escupiendo microbios de su tubo digestivo sobre la hoja, de modo que la planta cree que está bañada en bacterias en lugar de ser presa del insecto. La respuesta equivocada altera su capacidad para defenderse contra los artrópodos. Hace poco, Felton demostró que alimentando a los escarabajos con un tipo particular de bacterias lograba alterar su microbioma lo suficiente como para que ya no pudieran consumar su engaño.

La próxima revolución verde podría surgir de cualquiera de estos métodos que modifican el diálogo entre las plantas, las plagas y los habitantes del suelo, o de todos ellos. Pero antes hay cosechas experimentales de las que ocuparse y cuantiosos cálculos que hacer.

A finales del verano, una flota de cosechadoras se desplegó por multitud de campos desde Luisiana hasta Minnesota y desde Carolina del Norte hasta Nebraska para recolectar las parcelas experimentales de maíz y de soja plantadas por BioAg Alliance, nombre de la alianza de Monsanto con Novozymes. Los datos de las enormes máquinas se transmitían en el acto al centro de datos de Monsanto en San Luis, así como a las instalaciones de Novozymes en el Research Triangle Park, en Carolina del Norte. Los especialistas de ambos centros permanecieron expectantes ante la pantalla de sus ordenadores mientras contemplaban las cifras que llegaban de los campos. «Es como presenciar una carrera de caballos a cámara lenta», describe Scott Schaecher, director de la gestión de datos biotecnológicos de Monsanto.

Los expertos saben bien que es mejor no hacerse ilusiones con los primeros resultados. Los datos brutos resultan engañosos, pues no contemplan factores que podrían dar una ventaja de salida a un microbio o dejarlo rezagado. El microbioma edáfico puede variar de parcela a parcela, hasta en un mismo campo. Las condiciones meteorológicas pueden causar estragos:

las capas de microbios que recubren las semillas son arrastradas si llueve demasiado pronto, y hubo un año en que la alianza perdió miles de parcelas a causa del huracán Joaquín. Además del medio millón de puntos de rendimiento, el equipo mide 50 parámetros de cada muestra de suelo. Añádanse otros datos del fitobioma y acabaremos teniendo entre manos teraoctetos de información.

En el ordenador de su oficina, Schaecher accede a un mapa decorado con puntos rojos y verdes: verde para los microbios que mejoraron el rendimiento, rojo para los que lo redujeron. Representan los resultados de 2016 en cinco maizales. Él y su equipo desglosan los datos según las características del suelo y del ambiente, las condiciones meteorológicas y la presión de los insectos y las enfermedades. Ahondan así en los detalles de lugares con altos niveles del SMS de Díaz, para intentar identificar cualquier microbio que destaque en esas condiciones.

El equipo adopta una estrategia de «primero en el campo», lo que significa que prescinde de los experimentos en el invernadero y somete a prueba a los candidatos directamente en el terreno de cultivo. Por tanto, se ignora por completo los microbios que aportarán alguna ventaja, si los hay. En 2014, el primer año del ensayo, se sembraron semillas recubiertas con 500 cepas distintas, de las cuales el noventa por ciento fallaron. Al año siguiente, 2000 microbios entraron en la competición, entre los que figuraban los ganadores del primer año. Después de ese ensayo, quedó solo un puñado de los contendientes originales, junto con un par de cientos de los incorporados en la segunda ronda. En 2016 plantaron otras 2000 variedades: los que habían arrojado los mejores resultados en las rondas anteriores y un lote nuevo. Cuatro años después del inicio, solo permanecen en la contienda un microbio de la primera ronda y unos cientos de las posteriores. No se busca una flor de un día: se quiere auténticos campeones que año tras año tengan éxito en múltiples campos.

¿NEGOCIO ARRIESGADO?

Trabajar con microbios absolutamente naturales podría parecer inofensivo y exento de la controversia que rodea a los organismos modificados genéticamente (OMG), pero también plantea inquietudes. Modificar el medio microbiano podría alterar el sabor, del mismo modo que la composición del suelo influye en el gusto del vino. Una bacteria excelente para el rendimiento vegetal podría ser patógena y perjudicial para la salud humana. La aplicación prolongada de probióticos destinados a las plantas podría cambiar la dinámica natural del suelo y propiciar la proliferación de algunos microorganismos y la extinción de otros. También existe el riesgo de que el recubrimiento de las semillas, a semejanza de otros muchos agroquímicos que se vierten en los campos, sea arrastrado y contamine a otros cultivos.

Schaecher dice que BioAg Alliance trabaja con afán para evitar tales problemas. Somete sus cepas a una batería de pruebas antes de introducirlas en el campo. Secuencia cada genoma para cerciorarse de que el microbio no se parece a ningún patógeno humano y realiza otras pruebas para descartar que pueda ser tóxico para el ambiente o propagarse a otro cultivo. Él y su equipo consultan regularmente al Departamento de Agricultura de EE.UU., que decide si es preciso un permiso para que un microbio sea sometido a las pruebas al aire libre. Aquellos cuyo cometido es inocuo para las formas de vida, como la fijación de nitrógeno o la solubilización del fosfato, suelen ser aprobados. Aquellos más peligrosos por matar a otras bacterias u hongos, exigen más papeleo.

Entre los agrónomos, la mayor preocupación no es que los recién introducidos acaben dominando o se propaguen a otros cultivos, sino que no permanezcan en el medio el tiempo suficiente para surtir efecto, cualquiera que este sea, aclara Gwyn Beattie, fitopatólogo de la Universidad Estatal de Iowa y uno de los autores de la hoja de ruta de Fitobiomas. Una cucharada de tierra contiene unos 50.000 millones de microbios, de hasta 10.000 especies. No es difícil, pues, que aportar unos millones de individuos de una cepa no se note en nada. «Si introdujeras personas [de una en una] en Nueva York, la gran mayoría no cambiaría en nada la ciudad», explica Beattie. «Ocurre lo mismo en una comunidad microbiana. El aporte externo de microbios raramente deja huella, y esa es en realidad la mayor frustración.» (Un obstáculo similar afecta a los probióticos humanos, que pretenden mejorar la microflora intestinal, formada básicamente por billones de bacterias y levaduras. Promocionados en forma de polvo, píldoras o bebidas como tratamiento contra trastornos tan diversos como la diarrea o la depresión, pocos estudios han logrado demostrar hasta el momento efectos tangibles.)

Además, las actividades de Monsanto preocupan a grandes segmentos de la población, que la acusan de poner en peligro la salud humana, pisotear los derechos de los agricultores y monopolizar el suministro de alimentos. Esa hostilidad comenzó sobre todo a mediados de los años noventa, cuando el gigante agrícola lanzó una línea de cultivos transgénicos. Desde entonces, han surgido dos relatos antagónicos: uno, en el que la empresa crea semillas que duplican el rendimiento y conjuran épicamente la escasez de alimentos; el otro, en el que sus productos contaminan las campos de cultivo y provocan cáncer. En 2016, la Academia Nacional de Ciencias de EE.UU. concluyó el que quizás sea el examen más minucioso de los OMG hasta la fecha, y descartó que ninguna de esas afirmaciones fuera cierta. En su informe, la Academia llegaba a la conclusión de que los cultivos genéticamente modificados son tan inocuos como los convencionales, pero que «no hay pruebas» de que hayan propiciado grandes mejoras en el rendimiento de las cosechas.

El principal beneficio aportado por la soja, el algodón y el maíz genéticamente modificados es «un balance económico favorable para el productor». Cuando pregunté acerca de los resultados modestos que el informe dictamina, un portavoz de Monsanto admitió que habían modificado su argumento de ventas, que pasaba de nutrir al mundo a ayudar a los agricultores a obtener el mejor rendimiento posible al menor costo. Las ventas de la compañía en 2016 ascendieron a 13.500 millones de dólares, de los que casi 10.000 provienen de la venta de semillas, muchas mejoradas genéticamente. Los avances de las dos últimas décadas han ahorrado costes al agricultor y han redundado en beneficios para el sector agroindustrial, pero el aumento de la producción de alimentos sigue siendo una necesidad apremiante.

LAS COSECHAS DEL FUTURO

Las semillas que hoy plantan los agricultores estadounidenses no son las que sembraban sus abuelos. Es habitual que incorporen hasta 14 características genéticamente modificadas, apiladas una encima de otra. Esos apilamientos, como se los llama en la jerga de la profesión, suelen ir acompañados de otros productos que presumiblemente mejoran el rendimiento, como abonos, herbicidas y, en los últimos años, productos biológicos como los revestimientos microbianos de BioAg Alliance. Con todo, todavía queda mucho por saber acerca de lo que hace que una cosecha sea abundante, y tanto los científicos (académicos o del Gobierno) como las grandes empresas agrícolas, compiten por averiguarlo.

SI TE INTERESA ESTE TEMA...

Descubre *Retos de la agricultura*, un número de la colección *Temas* con las claves para entender el desafío que supone alimentar a una población mundial en constante aumento.



www.investigacionyciencia.es/revistas/temas/numero/71

A pesar de los avances en las técnicas de secuenciación, solo se ha identificado el 1 por ciento de la diversidad microbiana del suelo. Su propia naturaleza dificulta ver lo que ocurre bajo la superficie. Ha sido preciso recurrir a estudios con métodos destructivos, en que se sacan paladas de tierra para examinar sus componentes microbianos, como un gigante que pasara sus manos por la Tierra para capturar una muestra de la humanidad. De esa forma tal vez sabría qué personas habitan en ella, pero no cuáles eran sus ocupaciones o cómo se relacionaban antes de que su mundo quedase alterado.

Hace unos años un grupo escocés ideó un suelo artificial transparente que permite observar las comunidades microbianas asociadas con las raíces de las plantas. Elizabeth Shank, de la Universidad de Carolina del Norte en Chapel Hill, lo ha estado usando para estudiar las señales microbianas. Estos mensajes químicos van desde los de carácter letal (el 70 por ciento de los antibióticos derivan de metabolitos que los microbios segregan para repelerse entre sí) hasta los que son productivos, como los segregados para avisar de que se están congregando para formar una biopelícula con la que adherirse a las raíces. En noviembre de 2016, Shank presentó su trabajo en un simposio sobre fitobiomas en Santa Fe, Nuevo México. Relató que, al colorear diversos metabolitos microbianos con marcadores fluorescentes, pudo ver cómo se transmitían los mensajes entre las comunidades a medida que reaccionaban a sucesos como la siembra de una semilla, el aumento de la temperatura o una invasión de patógenos.

La innovación de Shank puede reportar grandes beneficios. O no. Muchos académicos como ella ofrecen sus descubrimientos a empresas o fundan las suyas. El ecosistema comercial vibra con las nuevas entidades, colaboraciones y fusiones, como la adquisición de Monsanto por Bayer, por 66.000 millones de dólares, en septiembre de 2016. El Gobierno estadounidense también ha entrado en liza. El proyecto de ley agraria de 2014 asignó 200 millones de dólares para crear la Fundación para la Investigación Agrícola y Alimentaria (FFAR) con objeto de promover los vínculos entre el sector productivo y las instituciones universitarias y académicas. En julio de 2016, la FFAR convocó a un grupo de expertos para debatir el modo de sacar el máximo partido del fitobioma.

Kellye Eversole, directora de Phytobiomes Alliance, advierte que si bien los círculos académicos, los estamentos oficiales y el sector agroindustrial comparten objetivos similares, sus métodos a veces divergen. Como las empresas se deben a sus inversores, tienen una mentalidad cortoplacista, orientada a las ganancias. «Carecer de investigación básica y no concebir un programa de proyectos a largo plazo resulta dañino», dice. Por otro lado, el sector agroindustrial posee recursos con los que todo profesor de botánica solo puede soñar: días después de la reunión convocada por la FFAR, Schaecher, de Monsanto, presentó una ponencia en el congreso de la Sociedad Americana de Fitopatología, reunión anual a la que asisten más de 1500 fitopatólogos. Cuando mostró el mapa de los ensayos de campo de BioAg Alliance, Linda Kinkel, de la Universidad de Minnesota, casi se cayó de la silla. «Si realmente están recopilando datos sobre 500.000 microbiomas edáficos, eso es más de lo que hacemos todos los demás.» Y no oculta su preocupación: «¿Cuánta ciencia hay en ello que nunca veremos?».

Aprovechar el fitobioma para mejorar los cultivos requerirá una integración completa de la información procedente de diversas fuentes y disciplinas, pero muchas de las partes no son accesibles. Los agricultores son reacios a facilitar a terceros los datos que recaban en sus campos; les preocupa la privacidad. BioAg Alliance divulga de vez en cuando algunos detalles a sus colaboradores universitarios, pero Schaecher invoca la necesidad de «proteger la ventaja competitiva» de Monsanto y Novozymes para justificar que no compartan todos sus datos. En 2017, la alianza lanzó su primer producto, un recubrimiento microbiano para semillas basado en un hongo descubierto en el suelo de un maizal que en promedio mejoró el rendimiento en casi 200 kg por hectárea durante las pruebas de campo. Las previsiones indican que el producto podría servir para aumentar la cosecha hasta en 36 millones de hectáreas cultivables en todo el mundo.

Es un primer paso, pero queda aún muy lejos de cubrir las necesidades de un planeta cada vez más abrumado. Aunque mejore el intercambio de datos entre los agrónomos, la solución al hambre probablemente no vendrá solo de la mano de la innovación biotecnológica. La solución implica abordar no solo el suministro de alimentos, sino el reparto y el desperdicio, las guerras, las luchas políticas, la desigualdad económica y el cambio climático. Fred Gould, entomólogo de la Universidad de Carolina del Norte, que dirigió la revisión de los OMG por la Academia Nacional de Ciencias de EE.UU., advierte que si algún día la ciencia es capaz de doblar la producción de alimentos, tal vez no sea lo más conveniente si lo consigue a costa de agotar la fertilidad del suelo y de poner en riesgo las futuras cosechas. También alerta de que las soluciones han de funcionar en el terreno. «Se puede tener todo ese conocimiento, pero depende tanto del ambiente, que habrá que manipular el fitobioma en cada granja», afirma. «Cuando se someten a prueba, algunas ideas resultan difíciles de poner en práctica.» Al final, la modificación del fitobioma seguramente sea solo una parte de la próxima revolución agrícola. También será necesaria voluntad política y mucha suerte. Después de todo, solo faltan 32 campañas anuales para 2050. IyC

PARA SABER MÁS

How microbes can help feed the world. Ann Reid y Shannon E. Greene. American Academy of Microbiology Colloquium, agosto de 2013. **www.asm.org/images/stories/documents/FeedTheWorld.pdf**
Herbivore exploits orally secreted bacteria to suppress plant defenses. Seung Ho Chung et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 110, n.º 39, págs. 15.728-15.733, 24 de septiembre de 2013.
Phytobiomes: A roadmap for research and translation. American Phytopathological Society, 2016. **www.phytobiomes.org/Roadmap/Pages/default.aspx**

EN NUESTRO ARCHIVO

Cultivos transgénicos: Sigue el debate. David H. Freedman en *IyC*, noviembre de 2013.
Tierra prodigiosa. Richard Conniff en *IyC*, noviembre de 2013.

por Marc Boada Ferrer



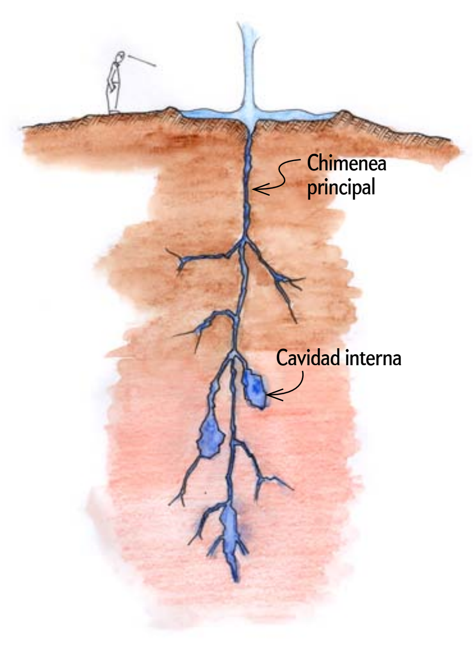
Marc Boada Ferrer es divulgador científico y experto en ciencia experimental.

Un géiser casero

Una de las más bellas e interesantes manifestaciones hidrotermales puede reproducirse fácilmente a escala de laboratorio

Imagine que, como por arte de magia, de repente se traslada ante un géiser típico. Lo que contemplará será más o menos lo siguiente: un retal de terreno relativamente llano, o ligeramente convexo, con una pequeña laguna de aguas someras en el centro. Si lo observa más de cerca, verá en ese centro un profundo pozo del que nunca se ve el fondo. Las aguas, a menudo de un precioso color azul o de tonos opalescentes, aparecen tranquilas, nada perturba su superficie. Pero si espera un rato, en el más inesperado momento los acontecimientos se precipitarán. Del pozo central y poco a poco se elevarán las aguas, formando pequeños «tsunamis» que azotarán los bordes de la laguna, que se desbordará. Luego, y cada vez más rápido, se elevará una altísima columna de agua hirviente que estrepitosamente alcanzará, quizá, decenas de metros de altura. Semejante eyección es acompañada por fuertes bufidos y resoplos de los vapores encargados de impulsar el agua. En breves instantes, todo habrá retornado a la quietud anterior. Eso sí, cada cierto tiempo la erupción se repetirá, ya que una de las singularidades de los géiseres es precisamente esa: su carácter cíclico.

Acabamos de asistir, aunque sea de forma imaginaria, a la erupción de un géiser, un espectáculo de tal magnitud que los escasos parques geotermales que hay en el planeta son destinos turísticos de primera magnitud. Y no es para menos. Se estima que hay solo unos mil géiseres en nuestro planeta y conocemos solo unos pocos fuera de él (en las lunas Encélado, Io y Europa). Además, los que aquí tenemos son cada vez menos, ya que las actividades de aprovechamiento de las fuentes termales e incluso los seísmos han secado algunos de ellos. Pese a ello, siguen siendo preciosos. Quien tenga la suerte de contemplarlos no podrá dejar de preguntarse cómo se produce semejante espectáculo. Tras su evidente belleza se esconden un conjunto de fenómenos físicos que pueden reproducirse fácilmente a pequeña escala. Es por ello por lo que hoy lo traemos a estas páginas.



Si observamos el dibujo de la derecha, en el que hemos representado la sección de un géiser, vemos que a determinada profundidad existen cavidades o grietas llenas de agua que se calienta por el calor geotérmico asociado a manifestaciones volcánicas. Como sabemos, el agua hierve a 100 °C, pero eso es cierto solo si se halla a 1 atmósfera de presión, cosa que no sucede a esas profundidades. Allí, la columna de agua de la chimenea principal comprime el líquido de forma que este hierve a una temperatura superior (se trata de un escenario similar al que se produce en una olla a presión). Lógicamente, si la roca encajante está a una temperatura muy elevada, el agua, tarde o temprano, se calentará hasta alcanzar una temperatura suficiente para hervir. Es en ese momento cuando el incipiente vapor generado aumenta suficientemente la presión como para empujar la columna de agua hacia arriba, instante en el que se inicia la erupción. Ahora viene lo bueno: aligerada la columna y reducida la presión, el agua de las cavidades más profundas se encuentra sobrecalentada y entra en una fase de

MARC BOADA *(fotografías y dibujos)*






ebullición en masa con una producción elevadísima de vapor a una presión extraordinaria; es entonces cuando la altura de la erupción alcanza su máximo. Este es el modelo de funcionamiento que deberemos satisfacer si queremos pergeñar un géiser a escala reducida.

Centrémonos ahora en la versión de laboratorio y hagamos una somera descripción preliminar. La maqueta del géiser consta de un recipiente en la base al que se ha soldado un largo tubo vertical; ambos son de hierro. Cerca de la boca, en la parte superior, una bandeja metálica llena de agua simula el estanque del que hablábamos al principio. Atendamos al dato de que todo el conjunto se encuentra lleno de agua. La estabilidad del instrumento se garantiza mediante cuatro patas de acero soldadas al depósito de la base. Todas se rematan con unos generosos tornillos de nivelación, un detalle esencial para un buen funcionamiento de la máquina. Bajo estas patas se halla un rudimentario recipiente de chapa de hierro, el brasero, en el que arde carbón vegetal animado por un soplante que improvisaremos con un secador de pelo. Como es lógico, la combustión del carbón simula el calor geotérmico; mediante la regulación de la aportación de aire podremos modificar suavemente su intensidad. El funcionamiento del aparato es simple y su puesta en marcha nos permitirá descubrir algunos pequeños secretos.

Para empezar, nos subimos a una escalera y, a través del tubo vertical, llenamos todo el circuito con agua caliente. No es fácil, ya que el agujero superior es relativamente angosto y el aire contenido en el interior del tubo escapa con dificultad, lo que ralentiza el paso del agua. Miremos el dibujo de detalle de ese punto. El tubo vertical de acero de 20 milímetros de diámetro está rematado con una arandela que limita su boca a solo 10 milímetros; de este modo, cuando se produce una erupción la altura de la columna es mucho mayor. Una vez lleno el circuito, aportaremos más líquido para que la laguna superior tenga una lámina de agua de unos 10 milímetros de profundidad. Este extremo es de lo más importante, ya que es el que garantiza la ciclicidad de las erupciones. (De no dotar a nuestro modelo de esa bandeja, el agua expulsada en las erupciones caería al suelo y se perdería, de modo que tendríamos que rellenar el circuito cada vez.) Por otro lado, a medida que las erupciones se suceden, el agua contenida en la bandeja se va calentando y cuando rellena por sí sola el circuito (luego volveremos a ello) ya está precalentada, lo que estabiliza y regulariza el período de retorno de las emisiones.

Sigamos con la puesta en marcha. Lleno el circuito y la bandeja superior, pasemos al aporte de calor. Ponemos unos carbones en el brasero, añadimos unas pastillas de encendido para barbacoas y activamos el secador de pelo. Idealmente, este debería ser del tipo que permite varias intensidades de funcionamiento; en caso que no sea así, podemos apartarlo del agujero de la caja para desviar parte del aire y moderar la combustión. Encendido el carbón, situémonos en un punto alto, y un poco alejado, que nos permita ver lo que sucede en la laguna superior. De entrada, nada, o muy poco. Solo algunas burbujas escapan por la boca del géiser.

Al cabo de cierto tiempo (variable en función de la temperatura inicial del agua, la potencia del fuego y la temperatura ambiente), veremos que el estanque empieza a moverse. Cada pocos segundos sale algo de agua y produce pequeñas oscilaciones en la superficie libre de la laguna. Luego, empezaremos a oír curiosos sonidos provenientes del recipiente inferior. El agua se está acercando a su punto de ebullición.

SECUENCIA FOTOGRÁFICA DE UNA ERUPCIÓN. El intervalo entre imágenes es aproximadamente de un segundo.



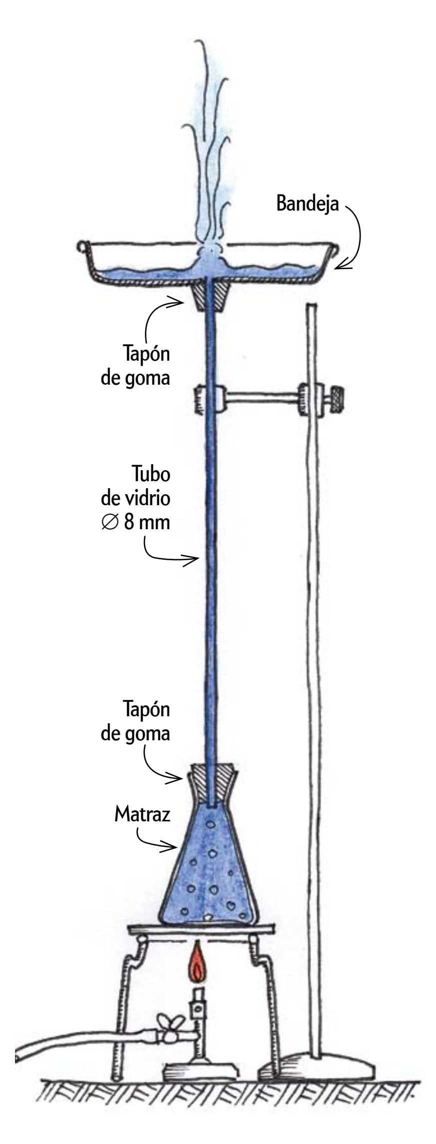



Detengámonos aquí para preguntarnos qué estará pasando en el interior de nuestro géiser. A diferencia de la olla de la cocina, donde siempre hay una superficie libre, en nuestro recipiente el agua se encuentra confinada y comprimida por la columna del tubo vertical; es más bien una caldera. Dado que la columna de agua tiene dos metros de altura, la presión en su base (de unos 0,2 kilos por centímetro cuadrado) se suma a la presión atmosférica. Ello equivale a unos 912 milímetros de mercurio en total. Si consultamos algunas tablas, descubriremos que a esa presión el agua hierve a unos 104 ºC. No está mal.

Pero debemos tener en cuenta dos aspectos muy importantes. Por un lado, en nuestro recipiente la convección se ve muy limitada; no dispone de una superficie libre y calentamos el recipiente por la base y los laterales, por lo que todo él está muy caliente, como si fuera un terreno volcánico. Por otro lado, el tubo vertical es tan estrecho que el agua caliente no puede subir por él, o lo hace muy lentamente y permanece fría y quieta, cuando en realidad debería estar precipitándose hacia el fondo del recipiente inferior. Por tanto, el contenido de este último se calienta rápidamente en toda su masa, acercándose a una especie de estado supercrítico.

Los ruidos que comentábamos proceden de puntos donde la ebullición intenta romper, ya sea porque están especialmente calientes o porque hay algún defecto en la pared interna que facilita la nucleación y la formación de burbujas; pero el intento dura poco y la presión lo extingue. Claro está, llega un momento en que la temperatura ya es tan elevada que ni siquiera la presión de la columna puede impedir el cambio de estado. El agua hierve, genera vapor a presión y este solo tiene una salida posible, el conducto vertical. Ha empezado la erupción.

La primera fase se caracteriza, como ya hemos visto, por una salida tranquila de líquido, a veces con suaves y rítmicas pulsaciones cuya frecuencia valdría la pena estudiar. Es la fase de vaciado de la columna de agua y también la de descompresión del recipiente inferior. Luego, el líquido rompe a hervir tumultuosamente, generando un enorme volumen de vapor. Es lo que desde el exterior se observa como la segunda fase, la de erupción explosiva que termina con la formación de un altísimo penacho de agua y vapor. En el modelo que aquí ilustramos, la altura de la columna supera generosamente el metro y medio. Es el momento más espectacular del experimento.



Pero la cosa no termina aquí, nos falta todavía la tercera y última fase. En esta, el recipiente inferior se ha enfriado muchísimo, ya que cuando hirvió instantes atrás absorbió también mucho calor del líquido, condensando rápidamente el vapor de agua residual. Se genera entonces un importante vacío en el interior del circuito, que solo puede ser ocupado por el agua del estanque superior. Con un sonido parecido al de una pajita de refresco que sorbe las últimas gotas de un vaso, parte del agua contenida en la bandeja es succionada hacia el interior del circuito. Acabamos de observar la primera erupción completa de nuestro géiser.

El espectáculo es magnífico y, de haber público, este queda encantado. Tanto, que permanece expectante esperando a las siguientes erupciones. En el modelo que hemos descrito, estas se suceden a intervalos de entre tres y cinco minutos, tiempo suficiente para dar cierta emoción al asunto y explicar la física del fenómeno.

Naturalmente, este es un modelo de géiser pensado para operar en un espacio exterior o en un local muy amplio con buena ventilación y suficiente altura (un gimnasio por ejemplo). Pero el experimentador también puede construir una versión más reducida de laboratorio. Como se indica en el dibujo de la izquierda, solo necesitaremos un matraz erlenmeyer, un par de tapones de goma y un tubo de vidrio resistente al calor de unos ocho milímetros de diámetro interior y un metro de longitud. Como en la versión para exteriores, la laguna puede simularse mediante una bandeja metálica circular de las que se usan en la cocina como molde para hornear. La fijaremos en la parte superior. La singularidad de este modelo radica en que uno puede observar lo que sucede en el interior de la cámara. Sin embargo, su fragilidad reclama un uso cauteloso.

Sea como fuere, el experimentador tiene un buen campo de investigación, ya que aún quedan algunas preguntas por responder acerca de los géiseres. ¿Por qué aparecen fluctuaciones periódicas en el nivel de la laguna poco antes de la erupción? —confieso que desconozco el motivo—. ¿Qué efecto tiene el diámetro del agujero superior en la altura que alcanza la columna de erupción? Más aún, sabemos que el tiempo entre los estallidos de un géiser debe depender fundamentalmente de dos parámetros (el volumen de agua que debe calentarse y la potencia térmica del sistema), pero, pese a todo, el ritmo nunca es totalmente regular. ¿Seríamos capaces de hallar una forma de pronosticar el momento de la próxima erupción a partir de los tiempos de las anteriores tal y como hacen algunos expertos con los géiseres naturales? Y aún nos quedaría un parámetro más por sondear: la altura de la columna de agua que sella el recipiente inferior. En nuestros experimentos nos hemos limitado a dos metros, pero... ¿qué pasaría si fueran tres, o cuatro? IyC

PARA SABER MÁS

El blog del autor aloja varios vídeos que muestran este géiser casero en funcionamiento: **https://www.investigacionyciencia.es/blogs/tecnologia/14/posts**

EN NUESTRO ARCHIVO

La dinámica oculta de los géiseres. Sarah Lewin en *IyC*, mayo de 2015.

por Patrick Honner



Patrick Honner es profesor de matemáticas y computación en un instituto de secundaria de Brooklyn, Nueva York. Reconocido divulgador, en 2013 recibió el Premio Presidencial a la Excelencia en la Enseñanza de Matemáticas y Ciencias de EE.UU.

El problema (matemático) con los pentágonos

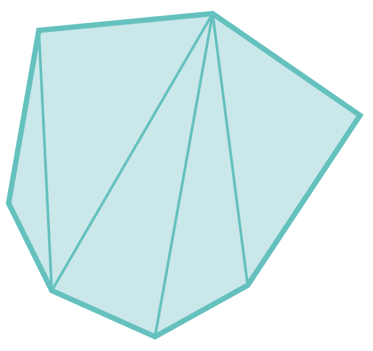
Los triángulos y los cuadrados permiten embaldosar fácilmente el plano. ¿Por qué los pentágonos no?

Las fichas de madera de los niños yacen esparcidas por el suelo. Usted empieza a jugar con ellas (cuadrados, rectángulos, triángulos y hexágonos), moviéndolas, volteándolas e intentando encajarlas. Siente una satisfacción primaria al crear un patrón perfecto a partir de estas formas; una experiencia con la que probablemente haya disfrutado otras veces. Pero, entre todas las piezas planas diseñadas para jugar en el suelo o sobre una mesa, ¿acaso ha visto alguna con forma de pentágono?

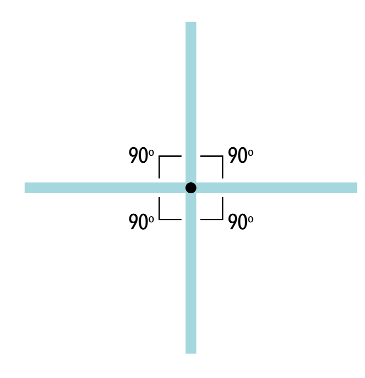
El ser humano lleva miles de años estudiando cómo encajar distintas formas geométricas para hacer juguetes, suelos, paredes y obras de arte, y también para entender las matemáticas que hay detrás. Pero, hasta el año pasado, nadie había conseguido resolver de una vez por todas la cuestión de cómo recubrir completamente el plano con polígonos de cinco lados. ¿Por qué han planteado los pentágonos un problema tan complejo durante tanto tiempo?

Teselaciones regulares

Para entender la cuestión, comencemos con una de las estructuras geométricas más sencillas y elegantes: las teselaciones regulares del plano. Se trata de disposiciones de polígonos regulares que recubren el plano por completo y a la perfección, sin superposiciones ni huecos. Pensemos en las teselaciones con triángulos equiláteros, cuadrados y hexágonos regulares. Podemos verlas en suelos, paredes y colmenas, y las usamos para empaquetar, organizar y construir cosas de manera más eficiente. Decimos que estas teselaciones son «monoédricas», ya que están formadas por un solo tipo de pieza, o tesela poligonal; «arista con arista», lo que significa que las esquinas de cada polígono siempre coinciden con otras esquinas; y «regulares», porque la tesela que se repite es un polígono con todos los lados y ángulos idénticos.



1 Un polígono de siete lados dividido en cinco triángulos.



2 Los ángulos que coinciden en un mismo punto han de sumar siempre 360 grados.

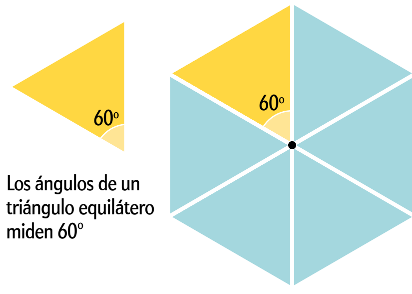
Curiosamente, los triángulos equiláteros, los cuadrados y los hexágonos regulares proporcionan las únicas teselaciones monoédricas, arista con arista y regulares del plano. Los matemáticos lo expresan diciendo que ningún otro polígono regular «admite» una teselación monoédrica y arista con arista del plano. Este importante resultado es, en realidad, bastante fácil de demostrar usando tan solo dos sencillas propiedades geométricas.

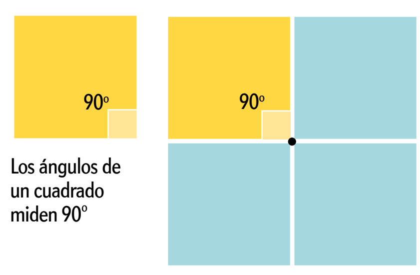
En primer lugar, sabemos que para un polígono de n lados, o n-gono, donde n vale al menos 3, la suma S_n de los ángulos interiores, medida en grados, viene dada por:

$$S_n = 180(n - 2).$$

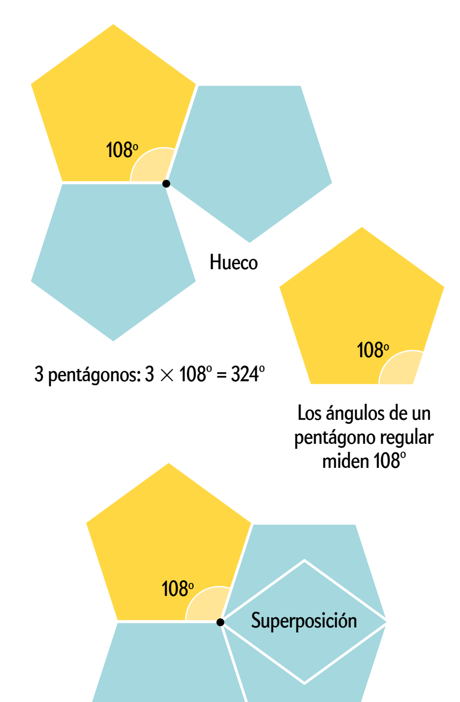
Esto se cumple para cualquier polígono con n lados, sea regular o no, y se deduce del hecho de que un polígono de n lados puede dividirse en $(n - 2)$ triángulos, los ángulos de cada uno de los cuales suman 180 grados (*véase la figura 1*).

En segundo lugar, notemos que el ángulo correspondiente a dar una vuelta





3 Dos teselaciones monoédricas y arista con arista del plano: con triángulos equiláteros y con cuadrados.



4 Los ángulos de un pentágono regular no pueden combinarse para recubrir el plano.

completa alrededor de un punto cualquiera es de 360 grados. Esto puede verse a partir de la intersección de dos líneas perpendiculares, ya que 90 + 90 + 90 + 90 = 360 (*véase la figura 2*).

¿Qué relación guardan estos dos hechos con las teselaciones de polígonos regulares? Por definición, los ángulos interiores de un polígono regular son todos idénticos. Y, dado que conocemos el número de ángulos, n, y su suma, $180(n - 2)$, basta con efectuar una división para calcular cuánto mide cada uno de los ángulos:

$$\theta_n = 180(n - 2)/n\,.$$

La tabla que reproducimos abajo muestra el valor del ángulo interno para distintos n-gonos regulares hasta $n = 8$, el octógono regular. Esta tabla suscita todo tipo de preguntas interesantes, pero por ahora lo único que deseamos saber es qué sucede cuando tratamos de juntar varios n-gonos iguales en torno a un punto.

En la teselación con triángulos equiláteros, vemos que en cada vértice se juntan seis triángulos. Eso produce el resultado que queremos: cada ángulo interno mide 60 grados, y 6 × 60 = 360, justo lo que necesitamos alrededor de un punto. Lo mismo ocurre con los cuadrados: cuatro de ellos y 90 grados por cada ángulo nos dan 4 × 90 = 360 (*véase la figura 3*).

Con los pentágonos, sin embargo, comienzan a aparecer problemas. Tres en un vértice suman 324 grados, lo que nos deja un hueco de 36 grados, demasiado pequeño para completarlo con otro pentágono. Y cuatro de ellos se solapan, por lo que no nos interesan (*véase la figura 4*). No importa cómo los organicemos: nunca conseguiremos que los pentágonos encajen bien alrededor de un vértice, sin huecos ni superposiciones. En otras palabras: el pentágono regular no admite una teselación monoédrica y arista con arista del plano.

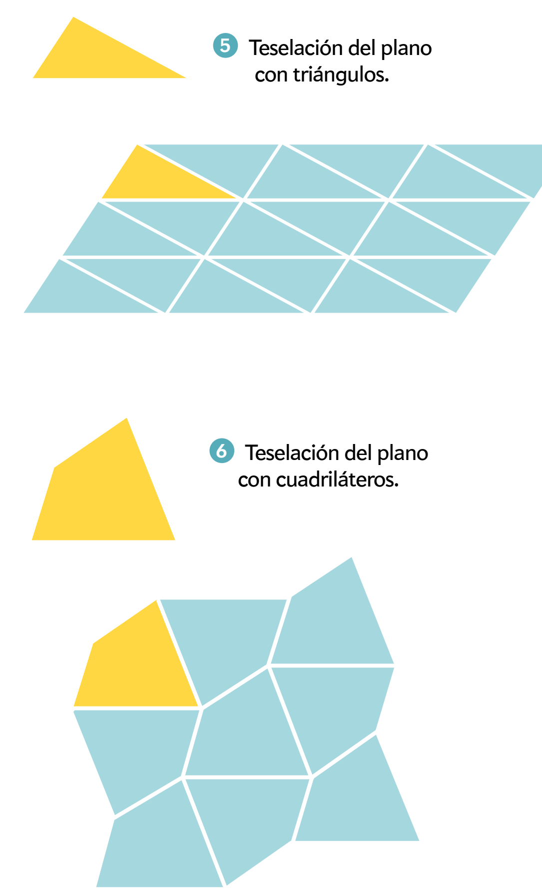
Un argumento similar muestra que, después del hexágono (cuyos ángulos de 120 grados permiten llenar a la perfección 360 grados), el procedimiento no funcionará con ningún otro polígono regular: sencillamente, los ángulos en cada vértice no sumarán 360 grados, como debería ocurrir. Así pues, ya entendemos por completo todas las posibles teselaciones monoédricas, arista con arista y regulares del plano.

Nuevos polígonos

Por supuesto, los matemáticos no se conforman con esto. Una vez que un problema queda resuelto, comienzan a relajar las condiciones. Por ejemplo, ¿qué sucede si no nos limitamos a los polígonos regulares? A partir de ahora consideraremos polígonos «convexos» (aquellos con ángulos interiores menores de 180 grados), pero no daremos por sentado que todos los lados y ángulos interiores son idénticos. ¿Bajo qué condiciones podemos recubrir el plano con ellos?

En el caso de triángulos y cuadriláteros, la sorprendente respuesta es: ¡siempre! Siempre es posible rotar un triángulo 180 grados en torno al punto medio de uno de sus lados para formar un paralelogramo, los cuales permiten cubrir el plano sin problemas (*véase la figura 5*). Y una estrategia similar sirve para cualquier cuadrilátero: solo hemos de rotarlo 180 grados alrededor del punto medio de cada uno de sus lados. Repitiendo el proceso, obtenemos una teselación del plano legítima (*véase la figura 6*). Por tanto, todos los triángulos y cuadriláteros, incluso los irregulares, admiten una teselación monoédrica y arista con arista del plano.

Con los pentágonos irregulares, sin embargo, las cosas no resultan tan sencillas. Puede que nuestra exitosa experiencia con triángulos y cuadriláteros nos haga albergar esperanzas, pero es fácil construir



5 Teselación del plano con triángulos.

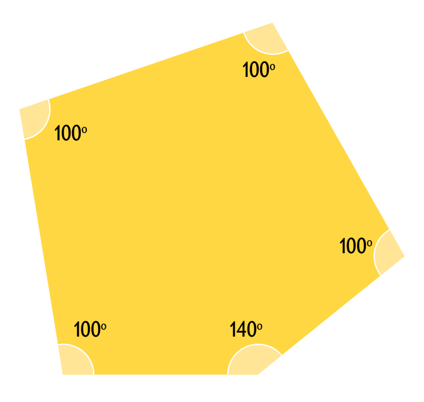
6 Teselación del plano con cuadriláteros.

n	Nombre	Suma de los ángulos interiores	Valor de cada ángulo interior
3	Triángulo equilátero	180	60
4	Cuadrado	360	90
5	Pentágono	540	108
6	Hexágono	720	120
7	Heptágono	900	128 + 4/7
8	Octógono	1080	135

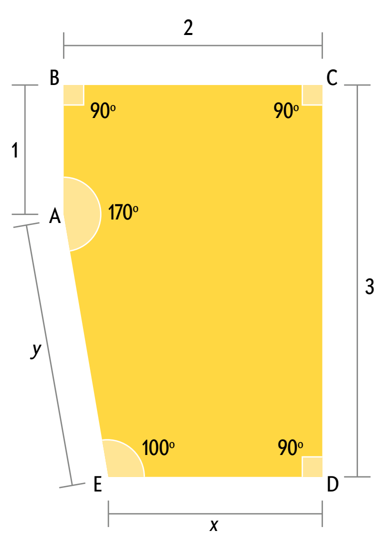
un pentágono irregular y convexo que no admite una teselación monoédrica y arista con arista del plano.

Consideremos un pentágono cuyos ángulos interiores midan 100, 100, 100, 100 y 140 grados. Quizá no resulte obvio que exista un pentágono así, pero, mientras no impongamos restricciones sobre la longitud de los lados, siempre podemos construir un pentágono con cinco ángulos cualesquiera que sumen 540 grados (*véase la figura 7*).

El pentágono que acabamos de describir no admite teselaciones monoédricas y arista con arista del plano. Para ver por qué, solo hemos de examinar cómo podríamos disponer múltiples copias de esta figura en torno a un mismo punto. Sabemos que, en cada vértice de nuestra teselación, los ángulos que coincidan allí habrán de sumar 360 grados. Sin embargo, es imposible juntar ángulos de 100 y 140 grados de forma que sumen 360. Así pues, este pentágono irregular nos enseña por qué no siempre es posible recubrir el plano con polígonos de cinco lados: existen ciertas restricciones sobre los ángulos que no satisfacen todos ellos.



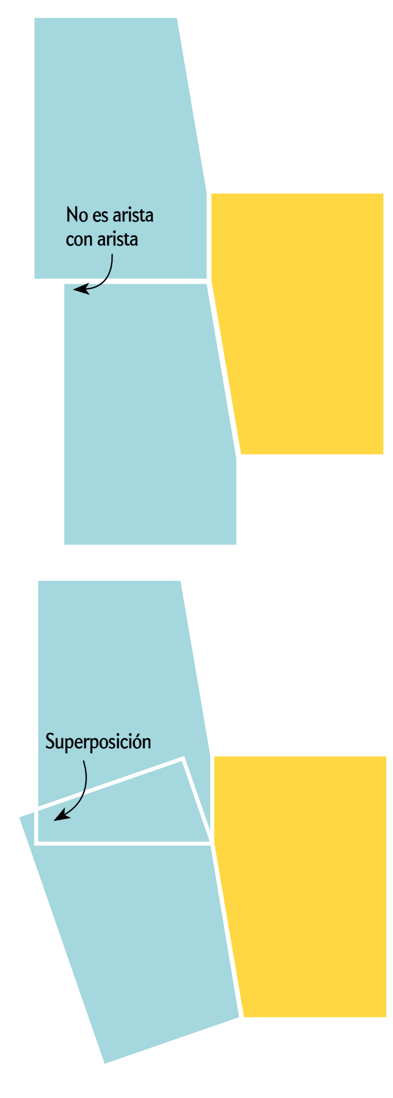
7 Pentágono con cuatro ángulos de 100 grados y uno de 140.



8 Pentágono con ángulos de 90, 90, 90, 100 y 170 grados, y tres lados de longitudes 1, 2 y 3.



9 Únicas opciones para unir los lados de longitud 1 con el pentágono de la figura 8.



10 Imposibilidad de generar una teselación arista a arista con el pentágono de la figura 8.

No obstante, tomar un conjunto de cinco ángulos que puedan combinarse para sumar 360 grados tampoco bastará para garantizar que un pentágono pueda recubrir el plano. Consideremos un pentágono con ángulos de 90, 90, 90, 100 y 170 grados (*véase la figura 8*). Estos pueden combinarse sin problemas para sumar 360: 170 + 100 + 90 = 360, y 90 + 90 + 90 + 90 = 360.

Los lados de nuestro pentágono obedecen también una relación particular. Las longitudes de AB, BC, CD, DE y EA son, respectivamente, 1, 2, 3, x e y. Resulta posible calcular x e y, pero basta con saber que se trata de complicados números irracionales, por lo que no valen 1, 2 ni 3, y que tampoco son iguales entre sí. Ello implica que, cuando intentemos construir una teselación arista con arista, cada lado de este pentágono solo podrá unirse al lado equivalente de la tesela contigua.

Sabiendo esto, podemos demostrar con rapidez que este pentágono no admite una teselación arista con arista del plano. Consideremos el lado de longitud 1. Solo existen dos posibilidades de unirlo con otro pentágono (*véase la figura 9*). La primera deja un hueco de 20 grados, que no hay modo de rellenar. La segunda crea un hueco de 100 grados. Disponemos de un ángulo de 100 grados que podemos usar para cubrirlo; pero, dado que el lado y ha de coincidir con otro lado y, solo tenemos dos opciones (*véase la figura 10*), y ninguna de ellas resulta compatible con una teselación arista con arista. Por tanto, hemos demostrado que este pentágono concreto no sirve para tal fin.

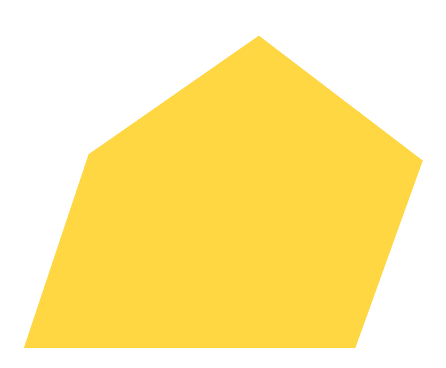
Búsqueda exhaustiva

Comenzamos a ver que las intrincadas relaciones entre los ángulos y los lados de un pentágono hacen especialmente difíciles las teselaciones monoédricas y

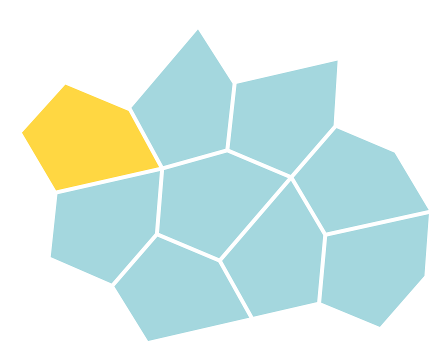
arista con arista. Necesitamos cinco ángulos tales que cada uno de ellos pueda combinarse con copias de sí mismo y con los otros cuatro para sumar 360 grados. Pero, además, los lados deben poder encajar con esos ángulos. Para complicar más las cosas, los lados y los ángulos de un pentágono no son independientes: imponer restricciones sobre los ángulos limita las longitudes posibles de los lados, y viceversa. Triángulos y cuadriláteros encajan siempre, pero, cuando se trata de polígonos de cinco lados, hay que hacer un ejercicio de equilibrismo para que todo cuadre.

Con todo, existen algunos pentágonos que sí lo consiguen. Uno de ellos fue descubierto en 1977 por Marjorie Rice, un ama de casa sin apenas formación matemática que se interesó por el problema a raíz de una columna publicada por Martin Gardner en *Scientific American* en 1975 (*véase la figura 11*). Como podemos comprobar, este pentágono sí admite una teselación arista con arista del plano (*véase la figura 12*).

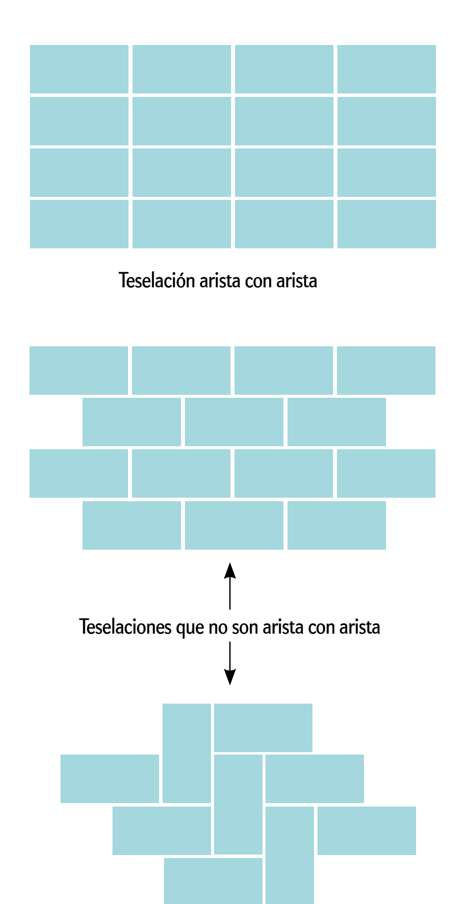
El asunto se complica aún más si seguimos relajando las condiciones. Al eliminar la restricción de que el recubrimiento sea arista con arista, abrimos la puerta a todo un mundo nuevo de teselaciones. Por ejemplo, un simple rectángulo de 2 por 1 no permite construir más que una teselación arista con arista del plano; sin embargo, admite infinitas teselaciones que no son arista con arista (*véase la figura 13*).



11 Uno de los pentágonos descubiertos por Marjorie Rice en los años setenta.



12 Teselación monoédrica y arista a arista con el pentágono de Rice de la figura 11.



13 Teselaciones rectangulares del plano.

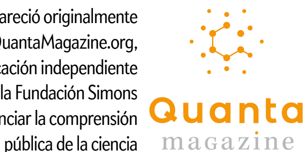
En el caso de los pentágonos, esto añade otra dimensión de complejidad al ya difícil problema de encontrar la combinación correcta de lados y ángulos. Y eso explica en parte por qué se necesitaron cien años, numerosas contribuciones y, por último, una búsqueda exhaustiva por ordenador para resolver la cuestión.

Los 15 tipos de pentágonos convexos que admiten teselaciones del plano (no todas ellas arista con arista) fueron descubiertos por Karl Reinhardt en 1918, Richard Kershner en 1968, Richard James en 1975, Marjorie Rice en 1977, Rolf Stein en 1985, y Casey Mann, Jennifer McLoud-Mann y David Von Derau en 2015. Por fin, el año pasado, Michaël Rao, matemático del CNRS francés y la Escuela Normal Superior de Lyon, logró verificar computacionalmente que esos 15 tipos de pentágono agotaban todas las posibilidades. Esto, unido a otros resultados conocidos (como que ningún polígono convexo de más de seis lados permite embaldosar completamente el plano), puso punto final a una importante pregunta en el estudio matemático de las teselaciones.

Cuando hablamos de recubrir el plano, los pentágonos ocupan un lugar intermedio entre lo inevitable y lo imposible. Disponer de cinco ángulos hace que el ángulo medio sea lo bastante pequeño para que haya una oportunidad de encajarlos todos a la perfección, pero también significa que pueden existir los suficientes desajustes entre los lados para impedirlo.

Una figura tan simple como el pentágono nos muestra que, incluso miles de años después, los mosaicos aún nos entusiasman, nos inspiran y nos sorprenden. Y, a la vista de las numerosas preguntas abiertas que aún quedan en el campo de las teselaciones matemáticas —como la búsqueda de una hipotética forma cóncava apodada *einstein* (por *ein Stein*, «una piedra» en alemán) que solo podría embaldosar el plano de forma no periódica—, es probable que aún sigamos encajando piezas durante largo tiempo.

Este artículo apareció originalmente en QuantaMagazine.org, una publicación independiente promovida por la Fundación Simons para potenciar la comprensión pública de la ciencia



PARA SABER MÁS

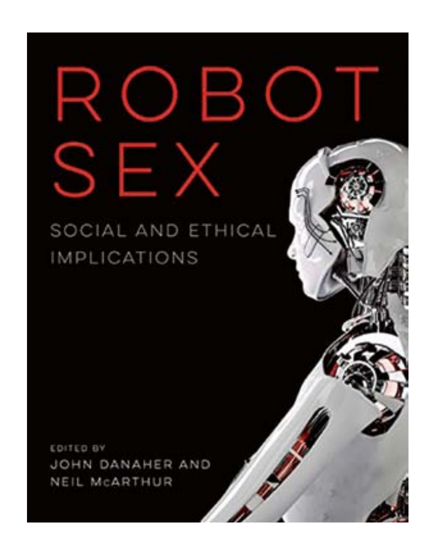
Exhaustive search of convex pentagons which tile the plane. Michaël Rao, 1 de agosto de 2017. Disponible en **arxiv.org/abs/1708.00274**

Troublesome tiles. Hoja de ejercicios para practicar con estudiantes los conceptos expuestos en esta columna (en inglés). Patrick Honner en *Quanta Magazine*, diciembre de 2017. PDF descargable en **bit.ly/2GLJ4Ii**

EN NUESTRO ARCHIVO

Los embaldosados de Penrose. Martin Gardner en *IyC*, marzo de 1977. Reeditado para «El universo matemágico de Martin Gardner», colección *Temas de IyC*, n.º 77, 2014.

Pavimentos y teselaciones. Ian Stewart en *IyC*, julio de 1990.



ROBOT SEX
SOCIAL AND ETHICAL IMPLICATIONS

Dirigido por John Danaher y Neil McArthur
The MIT Press, 2017

Robots sexuales

¿Los límites de nuestra sexualidad... o de la de los robots?

¿Robots sexuales? Si hasta hace poco hablar de este tema nos remitía a la ciencia ficción, los avances actuales en dildónica, robótica e inteligencia artificial nos muestran un panorama más realista en el que ya podemos encontrar algunos prototipos de tales máquinas. Por ello, resulta obvio que necesitamos con urgencia estudios que analicen el fenómeno desde diversos ámbitos, ya sea desde la psicología, la legalidad o la ética. El año pasado fue prolífico en este sentido, puesto que al informe pionero *Our sexual future with robots*, de la Fundación para la Robótica Responsable, se le sumó la presente obra.

Siendo la robótica un fenómeno más desarrollado en Asia (especialmente en Japón, Corea del Sur y China) que en Europa o EE.UU., debemos preguntarnos por la autoría del libro. Además, teniendo en cuenta que la sexualidad es un fenómeno eminentemente cultural, es importante clarificar quién y cómo realiza el estudio (sesgado). La autoría se reparte entre 18 personas que redactan 15 capítulos, siendo los autores 11 estadounidenses y 7 europeos, de los cuales 12 son hombres (7 estadounidenses y 5 europeos) y 6, mujeres (4 estadounidenses y 2 europeas). Escriben capítulos en solitario 7 hombres y 4 mujeres. Vemos, por tanto, un dominio estadounidense y masculino en las voces de los expertos. Sus especialidades son generalmente humanísticas —nada raro en un libro sobre ética y sociedad—, con una perturbadora presencia de especialistas en religión (Thomas Arnold, John Danaher, Noreen Herzfeld).

El libro está dividido en seis secciones que comienzan con una introducción al tema y continúan con la defensa del sexo robótico, los retos del sexo con robots, la perspectiva del propio robot, la posibilidad del amor robótico y, finalmente, el futuro de la robótica sexual. Pero, antes de continuar, debo explicar algo: uno de los retos del libro debería ser no tanto discutir sobre la relación entre sexualidad humana y robots, sino definir qué es la propia sexualidad humana. Tras ello, sería posible analizar las correlaciones, interacciones y puntos de encuentro sexual entre robots y humanos. Sin embargo, este primer paso, eminentemente biológico pero más aún cultural, no se da en la obra. Cada autor tiene su propia batalla y funda sus disquisiciones en una visión reducida e incompleta de lo sexual humano. Se echa en falta un capítulo de pura antropología o psicología de la sexualidad como punto de partida para las distintas (y comprensibles) disensiones. Pero vayamos por partes y analicemos los contenidos de cada sección.

«Introducción al sexo robótico» plantea una pregunta simple pero clave: ¿qué es el sexo con robots? De hecho, ¿existen robots sexuales? Tras un breve repaso a los instrumentos sexuales, cuyos antecedentes se remontan al falo esculpido en piedra de 28.000 años de antigüedad encontrado en las cavernas de Hohle Fels, en Alemania, se define el robot sexual como una máquina empleada con fines sexuales y que es humanoide, con comportamiento o movimiento humano y con cierto grado de inteligencia artificial. Puesto que tales condiciones no las cumple en nuestros días ningún robot, todo el libro se moverá entre el repaso de la ciencia ficción y los relatos hipotéticos usados como «estudios de caso» (más bien, experimentos mentales).

Los problemas éticos se ven delimitados aquí a tres aspectos: beneficios y perjuicios para los robots; beneficios y perjuicios para los humanos, y beneficios y perjuicios para la sociedad. En estos debates hay implícito un aspecto fundamental: ¿son los robots agentes autónomos o sujetos con derechos? De nuevo, en el libro se plantean problemas posibles, aunque este estadio se encuentre aún muy lejos de la realidad que vivimos. Incluso se habla de la imposibilidad de tal horizonte, puesto que los robots deberían ser siempre esclavos, algo que creo que choca con los avances contemporáneos en los debates sobre los derechos de las «personas no humanas» (como los chimpancés, tal y como defienden Jane Goodall, Richard Dawkins, Peter Singer o Steven Wise). Creo que debe tenerse claro que, en el horizonte de la identidad, la consciencia y la personalidad, los robots inteligentes entrarán de pleno derecho en tal categoría de personas no humanas. Finalmente, Mark Migotti y Nicole Wyatt defienden que, al no existir agencia por parte del robot, el sexo con robots es en realidad una masturbación asistida, e introducen al mismo tiempo nuevas nociones en el debate sobre sexualidad robótica (consentimiento, fidelidad, religión, reglas sexuales, pornografía, trabajo sexual y lazos emocionales, entre otros) sin considerar la variabilidad cultural de los mismos.

En «En defensa del sexo con robots», tras repasar los argumentos de Stuart Mill, Santo Tomás de Aquino, Kant, Amarya Sen o Martha Nussbaum, Neil MacArthur propone una teoría de la distribución equitativa del placer. Por distintas causas (demográficas, geográficas, por minusvalías, problemas psicológicos, contextos laborales, ancianidad, etcétera), muchas personas no tienen vida sexual o esta no es plena. Los robots podrían ayudar a tales individuos. Asimismo, si estuvieran bien diseñados, podrían ayudar a las personas a entender la sexualidad humana o incluso a clarificar su propia sexualidad sin dañar a nadie.

Sin embargo, existe también la posibilidad de que se hagan robots sobre algo que es un tabú universal: el incesto, o incluso relacionados con la pedofilia. Por este motivo, en 2015 la antropóloga Kathleen Ricardson emprendió la Campaña Contra los Robots Sexuales. Otro problema se debe a que la sexualidad retribuida ha perpetuado modelos heteropatriarcales dominantes e injustos, ade-

más de implicar forzadamente a muchas víctimas (mujeres y niños sobre todo), por lo que la incipiente robótica sexual reproduciría estos arquetipos sociales y conceptuales. En este sentido, John Danaher, Brian Earp y Anders Sandberg piden que se eduque a los individuos en las prácticas correctas, con el objetivo de evitar posibles daños entre los propios humanos derivados de nuevas prácticas tecnologizadas que, en el fondo, refuerzan las antiguas.

Por último, Ezio di Nucci trata las diferencias entre la importancia moral de la sexualidad y los derechos sexuales: ¿debe ser la sexualidad objeto de derecho, incluso para las personas que tienen intereses no aceptables, como los pederastas? En una espiral de contradicciones conceptuales fatuas, el autor acaba hablando de la responsabilidad de proteger a personas vulnerables (ancianos o personas con problemas mentales) de los posibles peligros implícitos en las prácticas sexuales. Personalmente, me suena a algo torticero que podría llamarse «eugenesia emocional», además de paternalista.

El tercer bloque, «Los retos del robot sexual», empieza con el estudio por parte de Noreen Hertzfeld de los debates del judeocristianismo en relación con la robótica sexual. Es un capítulo con numerosas referencias bíblicas interesantes; tan solo un estudio limitado de la humanidad, aunque toca aspectos religiosos generales, como la noción de lazos religioso-legales (matrimonio), el amor auténtico (sic) y la espiritualidad implicada en las relaciones amorosas.

John Danaher parte de un capítulo de la serie sobre androides *Humans*, en el que unos adolescentes no acaban «abusando» de un robot desconectado puesto que tal práctica sería reprobable en un entorno humano; por analogía corporal, de identidad y de acciones posibles, los adolescentes terminan por desistir. En la línea de Richardson, Danaher defiende que lo simbólico desempeña un papel fundamental en lo humano, de manera que las normas humanas deberían entrar en el debate y en el diseño de robots; el consentimiento, por ejemplo. De fondo subyace también el debate sobre el estatuto o no de los robots como personas humanas. En este sentido, recomienda una aproximación precavida a la sexualidad con robots, al poder ser perjudicial si no se diseña correctamente (el significado de «normativo» o «correcto» no es explicitado por el autor). Lo interesante es que plantea que las preferencias actuales de las personas marcan una actitud permisiva (por quienes denomina «procaucionarios») o represiva («precaucionarios») de la robótica sexual. Acaba reclamando un protocolo ético de entornos experimentales tecnológicos inspirado en las obras de Beauchamp, Childress o Van de Poel.

Litska Strikwerda redacta uno de los capítulos más candentes del libro, ya que versa sobre los conflictos relacionados con robots que emulan niños. Puesto que existen muñecos sexuales de niños e incluso pornografía infantil generada completamente por ordenador, ¿cómo debemos enfrentarnos a tales prácticas? ¿Existe en ambos casos una víctima legal o moral? En realidad, si bien es altamente reprobable, en la pornografía pedófila generada por ordenador no hay una víctima en un sentido estricto, por lo que la clasifica como parte de los «crímenes sin víctima». La tentación de ejercer un moralismo legal o paternalista puede resolver este problema acuciante, pero también abrir muchos otros, defiende. Hay incluso un problema mayor: en el DSM-5 (*Manual diagnóstico y estadístico de los trastornos mentales*) no se tipifica la adicción a la pornografía infantil como una adicción. De nuevo, se apela al daño en la virtud abstracta como posible elicitadora o inspiradora de acciones moralmente reprobables. Por ello, los robots sexuales infantiles, de existir, serían un facsímil artificial de un niño, lo que promovería posibles acciones en el mundo real. Como consecuencia, argumenta que deberían prohibirse (aunque en el caso de las imágenes por ordenador la distancia con el mundo real es algo mayor, como en los videojuegos violentos, verdaderos *blockbusters* y máquinas de ganar dinero con la violencia normalizada).

A pesar de sus claroscuros, *Robot sex* constituye una de las primeras obras con vocación de sistematicidad en los debates sobre sexualidad y robots

«La perspectiva del propio robot» es el apartado más abstracto del libro: ¿cómo verán los robots su diseño para la sexualidad? Aventuraría que se trata de una sección de «filosofía ficción» desmejorada, puesto que hay demasiados supuestos sin clarificar. El primero, propuesto por Steve Petersen, que los robots sean o no agentes con derechos. Una vez resuelto esto, casi todo lo demás viene determinado por códigos legales. Ahora bien, ¿deberemos respetar los gustos propios de los robots? Antes deberíamos saber si podremos reprogramarlos o no. Del mismo modo que educamos a los humanos, los robots podrían cambiar de parecer. El capítulo de Joshua Goldstein sobre la «nueva teoría de ley natural» es un ejercicio vacuo e insípido de palabrería académica totalmente eliminable.

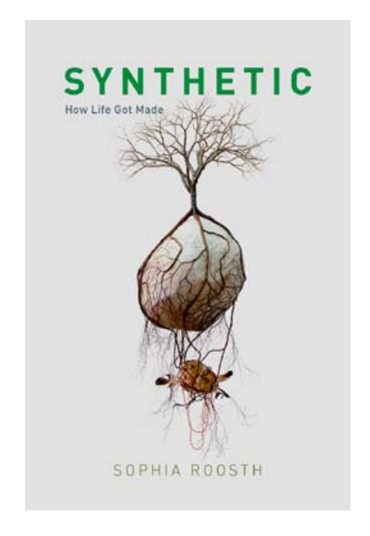
«La posibilidad del amor robótico» es, ya finalizando el libro, una sección menor con contribuciones poco desarrolladas; en este caso, los retos de qué sucederá cuando los robots tengan la posibilidad de amar. Aquí entra el debate sobre el transhumanismo de la mano de Michael Hauskeller, de nuevo en torno al estatuto o no de persona de los robots o de los transhumanos. ¿Tendrán emociones genuinas los robots? En calidad de experto en esta área, mi opinión es que sí, pero estamos tan lejos de ello que una aproximación simplista y antropocentrista no nos ayuda en nada, puesto que podrían tener emociones pero no como las nuestras, debido tanto a su estructura morfológica como a la sintaxis de sus moduladores (¿electroquímicos?). En suma, si pudieran amar, estaríamos ante diversos retos éticos sobre la libertad, la humanidad, el derecho a la vida u otros factores. Sven Nyholm y Lily Eva Frank se plantean, en la estela de lo narrado, la pregunta sobre si sería posible una relación de amor mutuo entre humanos y robots. El resumen: es posible pero complicado. El resto son repeticiones banales de los capítulos anteriores y referencias trasnochadas a Platón o Aristóteles.

En «El futuro de la robótica sexual» encontramos algunos de los mejores capítulos del libro. En primer lugar, el estudio empírico de Matthias Scheutz y Thomas Arnold sobre cómo los humanos

establecen relaciones simbólicas diversas con máquinas (intimidad, conexión, reciprocidad, ligazón). Las diferencias en el diseño de los robots y sus propiedades nos explican la complejidad de las posibles interacciones y de las respuestas humanas. Julie Carpenter escribe el mejor capítulo del libro, al analizar con precisión teórica todos los elementos y conflictos anteriores. Por vez primera, aparece una reflexión también profunda de la sexualidad o el amor, considerando nociones fundamentales como la cura, el apego o la mera sexualidad (genitalizada o no). Cierra el libro Marina Adshade al hablar sobre cómo los cambios tecnológicos llevan implícitos cambios sociales. En este sentido, se plantea si la robótica sexual cambiará la propia sexualidad humana, la naturaleza del matrimonio o incluso de la reproducción, o de los derechos de las mujeres y la distribución de roles. Predice, por ejemplo, una apertura a relaciones no exclusivas, en la senda del poliamor actual. También que los grupos con menos recursos económicos se beneficiarán menos de esta revolución.

A pesar de sus claroscuros, deficiencias o aciertos, este libro constituye una de las primeras obras con vocación de sistematicidad en los debates sobre sexualidad y robots. Queda mucho por hacer, pero no tanto en relación con los robots (todavía en un estadio muy alejado de los escenarios teóricos propuestos), sino más bien en los aspectos morales, religiosos y sociales relacionados con la sexualidad. Estamos simplemente trasladando nuestros prejuicios a las máquinas, sin entender que es necesaria una revolución en los modelos de pensamiento ético, antropológico, filosófico y social. Por suerte, los robots serán la excusa para nuestra evolución.

—Jordi Vallverdú
Departamento de Lógica y Filosofía de la Ciencia
Universidad Autónoma de Barcelona



SYNTHETIC
HOW LIFE GOT MADE
Sophia Roosth. Chicago University Press, 2017

Sintetizar la vida

Una perspectiva etnográfica de una de las últimas revoluciones en biología molecular

La biología sintética se propone proyectar componentes, mecanismos y sistemas biológicos inéditos, así como rediseñar los naturales ya existentes. En el curso de los últimos quince años, el avance registrado en biología molecular ha posibilitado la recreación de regiones codificadoras de ADN en bacterias, plantas y animales. Con el dominio del genoma podemos inducir, en organismos animales, enfermedades humanas. Pero la biología sintética va más allá. En su horizonte aparecen, a partir de materia inerte, una vuelta al origen de la vida y un replanteamiento de la noción de esta.

El término *sintético* hunde su origen en el siglo XVII, cuando fue recogido del griego *syntithenai*, que significa «poner juntos», «unir». Durante la Revolución Científica, experimentalistas y filósofos fueron incorporando paulatinamente el método sintético a sus planteamientos analíticos en física, metafísica y matemática. Análisis y síntesis se reconocían útiles complementarios. Cuando emergió la química orgánica, en el siglo XVIII, *sintético* se refería a la fabricación de compuestos orgánicos por el hombre. Fue Immanuel Kant quien le otorgó un poderoso impulso filosófico.

En las ciencias de la vida, un giro decisivo se dio a finales del siglo XX. Ingenieros e informáticos se pasaron con sus armas conceptuales y bagajes técnicos y experimentales al dominio de la biología. Resolvieron que, si el propósito de la biología era comprender la vida, el crearla permitiría idear teorías más precisas que las concebidas hasta entonces. Trataron el material biológico como elemento de diseño y manufactura: genomas bacterianos que codificaran pasajes de James Joyce, o levaduras quiméricas con genes cosechados de petunias, ajenjo y microorganismos de las fuentes termales de Islandia [*véase* «Biología sintética», por David Baker et al.; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto de 2006].

En *Synthetic,* Sophia Roosth acomete el primer estudio etnográfico de la disciplina en una obra que documenta las transformaciones sociales, culturales, retóricas y económicas que la biología ha experimentado en esta edad posgenómica. Una investigación etnográfica de campo desarrollada entre 2005 y 2012, sumergida en laboratorios de científicos dedicados a la materia. Más allá de las probetas y los ratones, el libro analiza los compromisos políticos, estéticos, económicos, sociales y religiosos de los biólogos sintéticos [*véase* «Biología sintética y ciencias sociales, un diálogo difícil», por Pierre-Benoit Joly y Benjamin Raimbault; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre de 2014].

Muy pronto, la biología sintética se robotiza. En el año 2000 se publicaron dos artículos clave que iniciaron una revolución en la introducción de nuevas funciones en el interior celular. Se tomaron dos circuitos electrónicos (un oscilador y un conmutador) y se construyó el equivalente de la materia viva. La vida convertida en una máquina. La autora inicia su recorrido con el trabajo pionero de Drew Endy en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, donde rediseñó el virus T7 [*véase* «Células cibernéticas», por W. Wayt Gibbs; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre de 2001]. Sigue, en California, con la obra de Jay Keasling y otros. Keasling desarrolló una vía microbiana sintética para fabricar artemisinina, un compuesto contra la malaria, para distribuirlo en países en vías de desarrollo.

La obra también reseña los avances en ingeniería metabólica. Al sacar a la luz enzimas promiscuas y vías metabólicas no naturales, penetra en el parentesco sintético y la irisación de las fronteras entre especies. Ejemplos que cristalizan en BioBrick y en la obra en genómica sintética de Craig Venter. En 2010, Venter alegó haber creado vida sintética. Su laboratorio insertó el genoma de la bacteria *Mycoplasma mycoides* (sintetizado y ligeramente modificado) en una célula «muerta» de un organismo estrechamente emparentado, reavivando el protoplasma.

La secuenciación y la síntesis permiten a los biólogos sintéticos traficar entre moléculas físicas de ácidos nucleicos (ADN y ARN) y secuencias genéticas desmaterializadas que evolucionan a través de pantallas de ordenador. Secuenciar significa leer las cadenas de cuatro bases nucleotídicas que constituyen el ADN y el ARN para componer una secuencia genética digital escrita literalmente con letras, en sustitución de la molécula. La síntesis opera en sentido contrario: utiliza técnicas de genómica para construir físicamente macromoléculas de ácidos nucleicos de acuerdo con la base de las secuencias genéticas deseadas. Más allá de estas herramientas, la labor en los laboratorios de biología sintética es muy similar a la de otros campos.

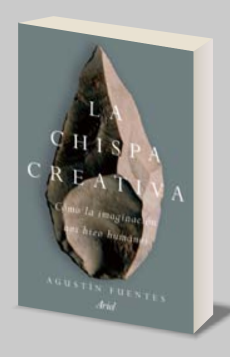
La fabricación de nuevas formas de vida requiere la depuración de términos que se suponen de sentido común: natural y artificial, biológico y sintético

La biología sintética busca, en efecto, ensamblar componentes que no son naturales para generar sistemas químicos que presten soporte a la evolución darwinista (biológica). Al ensamblarlos de manera artificial, los científicos esperan comprender la biología no sintética, es decir, la natural. En su ecuación de fabricación y comprensión, de síntesis y análisis, la fabricación de vida no es un fin, sino una técnica para acrisolar los márgenes de la vida. La fabricación de nuevas formas de vida requiere también la depuración de términos que se suponen de sentido común: natural y artificial, biológico y sintético.

Hoy la mayor parte de la investigación se desarrolla en Europa occidental —especialmente en el Reino Unido, Alemania y los Países Bajos— y en Estados Unidos, donde el grueso del trabajo se concentra en California y Nueva Inglaterra. Pero la investigación en biología sintética se ha extendido por todo el país. En 2013 había 174 universidades estadounidenses implicadas en alguna forma de investigación en biología sintética, un trabajo que recibe financiación de distintos organismos estatales: los Institutos Nacionales de la Salud, la Oficina de Proyectos Avanzados de Investigación para la Defensa, el Departamento de Energía y la Fundación Nacional para la Ciencia. Esas organizaciones se interesan en el campo por sus potenciales aplicaciones comerciales: energías limpias, armas biológicas y síntesis económica de fármacos.

—Luis Alonso

NOVEDADES



LA CHISPA CREATIVA
CÓMO LA IMAGINACIÓN NOS HIZO HUMANOS
Agustín Fuentes
Ariel, 2018
ISBN: 978-84-344-2723-5
464 págs. (22,90 €)



¡QUE SE LE VAN LAS VITAMINAS!
MITOS Y SECRETOS QUE SOLO LA CIENCIA PUEDE RESOLVER
Deborah García Bello
Paidós, 2018
ISBN: 978-84-493-3406-1
256 págs. (17,95 €)



ILUMINANDO EL LADO OSCURO DEL UNIVERSO
AGUJEROS NEGROS, ONDAS GRAVITATORIAS Y OTRAS MELODÍAS DE EINSTEIN
Roberto Emparan
Ariel, 2018
ISBN: 978-84-344-2731-0
248 págs. (18,90 €)



EL SUEÑO DE HUMBOLDT Y SAGAN
UNA HISTORIA HUMANA DE LA CIENCIA
José Manuel Sánchez Ron
Crítica, 2018
ISBN: 978-84-17067-72-4
272 págs. (29,90 €)

Recopilación de Daniel C. Schlenoff

MARZO



1968




1918



1868

1968

El límite de Hayflick

«¿Puede alargarse la vida humana, o hay un inescapable mecanismo de envejecimiento que restringe la longevidad al aparente límite actual? Hasta un tiempo reciente, pocos biólogos se atrevían a abordar el estudio del proceso básico del envejecimiento; obviamente, no es un tema que se preste con facilidad a un estudio detallado. Sin duda, en el envejecimiento del cuerpo intervienen numerosos mecanismos. En nuestro laboratorio del Instituto Wistar hemos investigado solo una cuestión: el límite de la división celular. Nuestros trabajos se han centrado particularmente en las células estructurales llamadas fibroblastos, productoras de colágeno y fibrina. Esas células, al igual que otros blastocitos, siguen dividiéndose en el cuerpo adulto. Nos propusimos determinar si los fibroblastos humanos en un cultivo celular podían dividirse indefinidamente o si su capacidad para ello era finita. —Leonard Hayflick»

Convergencia bilingüe

«Al ofrecer a un individuo bilingüe información en una lengua y luego preguntársela en la otra, el investigador podría aprender mucho acerca de las operaciones mentales que intervienen en la adquisición, almacenamiento y recuperación de la información. Dos hipótesis, ilustradas mediante unos depósitos dispuestos de dos maneras, representan el modo en que una persona bilingüe maneja la información. Según una de ellas (*a la izquierda en la ilustración*), toda la información se centraliza en un depósito y la persona accede a ella igualmente en ambas lenguas, representadas por distintos grifos. Según la otra hipótesis (*derecha*), la información se almacena de modos lingüísticamente asociados, o en depósitos separados. Experimentos del autor indican que en la situación real de una persona bilingüe se combinan partes de ambas hipótesis.»

1918

La próxima guerra de Alemania

«Un libro escrito por el teniente general barón von Freytag-Loringhoven lleva el título de *Conclusiones de la Guerra Mundial*. El general es segundo jefe del Estado Mayor. Aunque él no explicite sin ambages que Alemania ha fracasado en esta guerra, no es posible leer esta obra sin darse cuenta de que el Alto Estado Mayor entiende que la gran apuesta por la que jugaron está perdida, al menos por ahora. Von Freytag-Loringhoven nos da a entender que Alemania haría esta guerra con toda su vasta experiencia, el paso intermedio hacia otro intento del que seguramente saldría triunfadora.»

Vuelve la malaria

«En tiempos la malaria era corriente en ciertas zonas de Inglaterra, pero fue del todo erradicada gracias al alcantarillado y al uso de la quinina, pese al hecho de que el mosquito anófeles permanece en el país. Se quebró el ciclo parasitario y el insecto dejó de estar infectado. Nos llega ahora noticia de una recrudescencia de la malaria autóctona en Inglaterra. Según una circular publicada por la Junta de Gobierno Local, muchos hombres han contraído la enfermedad cuando combatían en los frentes del este y la han llevado consigo al regresar; sirven así de focos de infección para la población civil.»

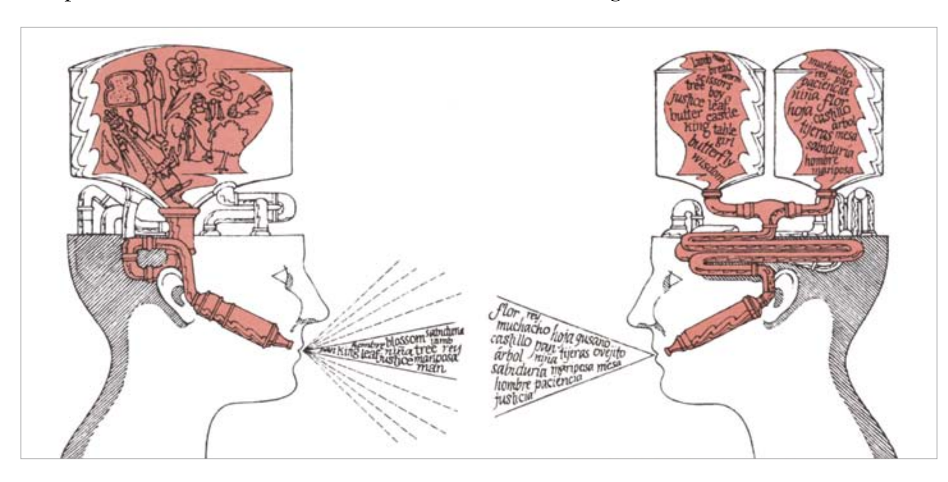
1868

El cólera dominado

«Parece haber buenos motivos para creer que el cólera epidémico ha sido derrotado por el poder de la inteligencia. Entre las numerosas sustancias que se producen cuando el carbón bituminoso se somete a destilación seca figura un compuesto que ha tomado el nombre de gas carbólico. Esta sustancia parece haber dado al hombre el control sobre las últimas y más terribles pestilencias que han afligido al mundo. Varias veces durante el verano y el otoño de 1866 el cólera se presentó en esta ciudad [Nueva York], y cada vez fue erradicado por el Consejo Sanitario. El doctor Harris y otros miembros del consejo consideran el gas carbólico como el más efectivo de los agentes que emplearon.»

Medir las distancias

«Dice un corresponsal regresado hace poco de Oriente: "En Turquía, la única forma de medir distancias es mediante el andar de un caballo, y al viajero que pregunta la distancia a un pueblo o ciudad se le informa que el lugar se halla a tantos *días* u *horas* de caravana, algo que desde luego no siempre es lo mismo. Ello supone un gran problema para un extranjero."»



1968: A los «depósitos» de información del cerebro bilingüe puede accederse, bien por igual en ambas lenguas, o bien por separado en cada una de ellas.

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. 218, N.° 3; MARZO DE 1968; DIBUJO DE CHAS. SLACKMAN



COSMOLOGÍA

El misterio de los primeros agujeros negros supermasivos

Priyamvada Natarajan

Datos recientes muestran que estos colosos comenzaron a poblar el universo mucho antes de lo que se creía posible. ¿Cómo se formaron?

BIOLOGÍA

Aplicación de la genética a la conservación del lince ibérico

Elena Marmesat, María Lucena-Pérez y José A. Godoy

Las técnicas genéticas y genómicas están ayudando a diseñar estrategias para mejorar la viabilidad de la especie, que sufre un notable deterioro genético.



TECNOLOGÍA

¿Está el móvil embotando el cerebro de los adolescentes?

Carlin Flora

Titulares recientes nos hacen creer que los adolescentes enganchados al teléfono inteligente están condenados mental y socialmente. La realidad no es tan simple.



MEDICINA

INFORME ESPECIAL: DIABETES

Una vacuna contra la diabetes de tipo 1

Kristen M. Drescher y Steven Tracy

Cirugía de acortamiento intestinal para la diabetes de tipo 2

Francesco Rubino

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA GENERAL
Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz, Bruna Espar Gasset
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF AND SENIOR VICE PRESIDENT
Mariette DiChristina
PRESIDENT Dean Sanderson
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek



DISTRIBUCIÓN

para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca - Trigo, 39 - Edificio B
28914 Leganés (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD

Prensa Científica, S. A.
Tel. 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Tel. 934 143 344 - Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Javier Grande: *Apuntes*, *Materia oscura axiónica* y *El problema (matemático) con los pentágonos*; Andrés Martínez: *Apuntes* y *La senda hacia la reptación*; José Óscar Hernández Sendín: *Hacer saltar la banca*, *El mundo que el bitcóin ha forjado*, *El impacto social de las cadenas de bloques* y *Buenas noticias para la impresión en 3D con metales*; Pablo Mugüerza y Paz Gómez Polledo: *Cuando nuestras defensas se vuelven contra los fármacos*; Teresa Piñel: *Göbekli Tepe, espejo de la transición neolítica*; Mercè Piqueras: *La revolución del fitobioma*; Fabio Teixidó: *Un géiser casero*; J. Vilardell: *Hace...*

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. de Caldes, km 3
08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España